

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra aplikované mechaniky

**Návrh metodiky zkoušek odolnosti
proti opotřebení pro vybrané materiály
železničních kol**

Proposal of Methodology in Testing Wear
Resistance for Selected Railway Wheel
Materials

Student:

Bc. Jiří Šmach

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Michal Šofer, Ph.D.

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jiří Šmach**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 3901T003 Aplikovaná mechanika
Téma: **Návrh metodiky zkoušek odolnosti proti opotřebení pro vybrané materiály železničních kol**
Proposal of Methodology in Testing Wear Resistance for Selected Railway Wheel Materials
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Zpracujte teoretický úvod v oblasti materiálových zkoušek odolnosti proti kontaktní únavě.
2. U vybraných jakostí materiálu železničních kol realizujte porovnávací zkoušky odolnosti proti kontaktní únavě při Vámi zvolených maximálních kontaktních tlacích a skluzech.
3. Na základě realizovaných testů vytvořte metodiku zkoušení s cílem od sebe odlišit materiály rozdílných jakostí a povrchových tvrdostí tak, aby tato metodika mohla být aplikovatelná pro potřeby odhadu životnosti materiálu železničních kol.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] Popov, V.: Contact Mechanics and Friction, Springer 2010, 362 p. ISBN 978-3-642-10802-0
[2] Kikuchi, N; Oden, J.T.: Contact Problems in Elasticity: A Study of Variational Inequalities and Finite Element Methods, SIAM 1998, 495 p. ISBN 978-0-898-71202-5
[3] Wriggers, P.; Nackenhorst, U.: Analysis and Simulation of Contact Problems, Springer 2006, 390 p. ISBN 978-3-540-31760-9

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Michal Šofer, Ph.D.**

Datum zadání: 09.12.2016

Datum odevzdání: 15.05.2017



doc. Ing. Radim Halama, Ph.D.
vedoucí katedry

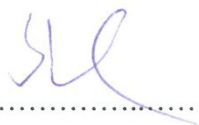


doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě: 15. května 2017



.....

Podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́домі, že Vysoká škola Báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB–TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavře licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́домі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 15. května 2017



.....
Podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce:

Jiří Šmach

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Železná 138

Vrbno pod Pradědem

793 26

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Šmach, J *Návrh metodiky zkoušek odolnosti proti opotřebení pro vybrané materiály železničních kol: diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra pevnosti a pružnosti, 2017, Vedoucí práce: Šofer, M.

Předložená diplomová práce se věnuje teoretickým rozborem vzniku a šíření trhlin se zaměřením na problematiku kontaktní únavy, teoretickým rozborem zkušebních zařízení používaných k realizaci zkoušek opotřebení a kontaktní únavy, praktická část se věnuje realizaci zkoušek opotřebení pro zvolené materiály včetně návrhu metodiky zkoušení. Samotné zkoušky odolnosti proti opotřebení byly realizovány ve spolupráci s firmou Bonatrans Group a.s. se sídlem v Bohumíně na zkušebním stroji typu twin-disk, dodaném firmou INOVA. Navrhovaná metodika pro zkoušky odolnosti proti opotřebení se snaží zohledňovat nejen parametry samotného testu (maximální kontaktní tlak, prokluz), nýbrž i vlastnosti materiálů, které jsou podrobeny samotné zkoušce a geometrii vzorků.

Klíčová slova: twin-disk test, odolnost proti opotřebení.

ANNOTATION OF THESIS

Šmach, J *Proposal of Methodology in Testing Wear Resistance for Selected Railway Wheel Materials: Master Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Applied mechanics, 2017, Thesis head: Šofer, M.

Submitted Master's thesis deals with theoretical analysis of initiation and propagation of cracks focusing on contact fatigue, overview of test rigs, used for the purposes of realization of contact fatigue and wear resistance tests. The practical part deals with realization of wear resistance tests for selected materials including the proposal of the testing methodology. The wear resistance tests were realized with cooperation of Bonatrans Group Inc. based in Bohumín. The wear resistance tests were performed on twin-disc test rig, manufactured by INOVA company. Proposed testing methodology takes into account not only the parameters of the test in itself (maximum Hertz contact pressure, slip), but also the material properties of tested specimen and their geometry.

Keywords: twin-disc test, wear resistance.

OBSAH

SEZNAM POUŽITÉHO ZNAČENÍ.....	8
1 Úvod	9
2 Opotřebení	10
2.1 Adhezivní opotřebení	10
2.2 Abrazivní opotřebení	11
2.3 Únava materiálu	12
2.4 Vznik trhlin	13
3 Materiálové zkoušky odolnosti proti kontaktní únavě	17
3.1 Micro Pitting Rig (MPR)	17
3.2 Twin-Disk test	18
3.2.1 AMSLER	18
3.2.2 LEROS	19
3.2.3 SUROS	20
3.2.4 NISHIHARA	20
3.2.5 Two-roller testing machine	21
3.2.6 Twin-disc rolling-sliding frictional machine	22
3.2.7 TUORS	22
3.2.8 TUORS II.	23
3.2.9 Zařízení firmy Bonatrans Group a.s.	24
3.2.10 Shrnutí jednotlivých strojů	26
3.3 Stationary Element Rolling Contact (SERC)	27
3.4 Ball on Disk test	28
3.5 Rolling Contact test	29
3.6 Srovnání jednotlivých zařízení	29
4 Porovnávací zkoušky	31

4.1	Materiál pro zkoušky.....	31
4.2	Naměřené parametry jednotlivých vzorků	31
4.3	Výpočet přítláčné síly	32
4.4	Naměřené výsledky	33
4.5	Změna Hertzova tlaku	35
5	Výpočet skutečného Hertzova tlaku	36
5.1	Naměřené profily kontaktní plochy vzorků	36
5.2	Skutečný Hertzův tlak	39
6	Návrh metodiky měření	41
7	Závěr.....	42
8	Seznam použité literatury	44
9	Seznam přílohy	46

SEZNAM POUŽITÉHO ZNAČENÍ

[illegible]

1 Úvod

Nejstarší zachovaný prototyp kola k povozu je datován kolem roku 3100 př. n. l. v oblasti zvané Stare Gmajne u obce Vrhnika ve Slovinsku. Objeveny byly i malby na pohárech staršího data. Kolo se později rozšířilo po celé Evropě a do Číny. Na americkém kontinentu došlo k užívání až příchodem evropských dobyvatelů.

První prototypy železnice jsou datovány kolem 6. stol. př. n. l. v Řecku pro převoz lodí. Tato železnice nepoužívala klasické kolejnice, jaké jsou známy dnes, ale vápencové žlaby. Dřevěné kolejnice se používaly v Evropě až v 16. a 17. století pro přepravu uhlí v dolech a jejich okolí. Na ocel se přešlo na přelomu 18. a 19. století. Jedna z prvních tratí se nacházela mezi městy České Budějovice a Linec, avšak nejednalo se o klasickou trať, jak jí známe dnes. Byly použity dřevěné trámy, na kterých byl ocelový pás. Dřevěné trámy byly uloženy v kamenných úchytech ve tvaru písmene U. V první polovině 19. století se s počátkem válcování přešlo na celokovové stoličkové kolejnice, později na širokopatní kolejnice, užívané dodnes.

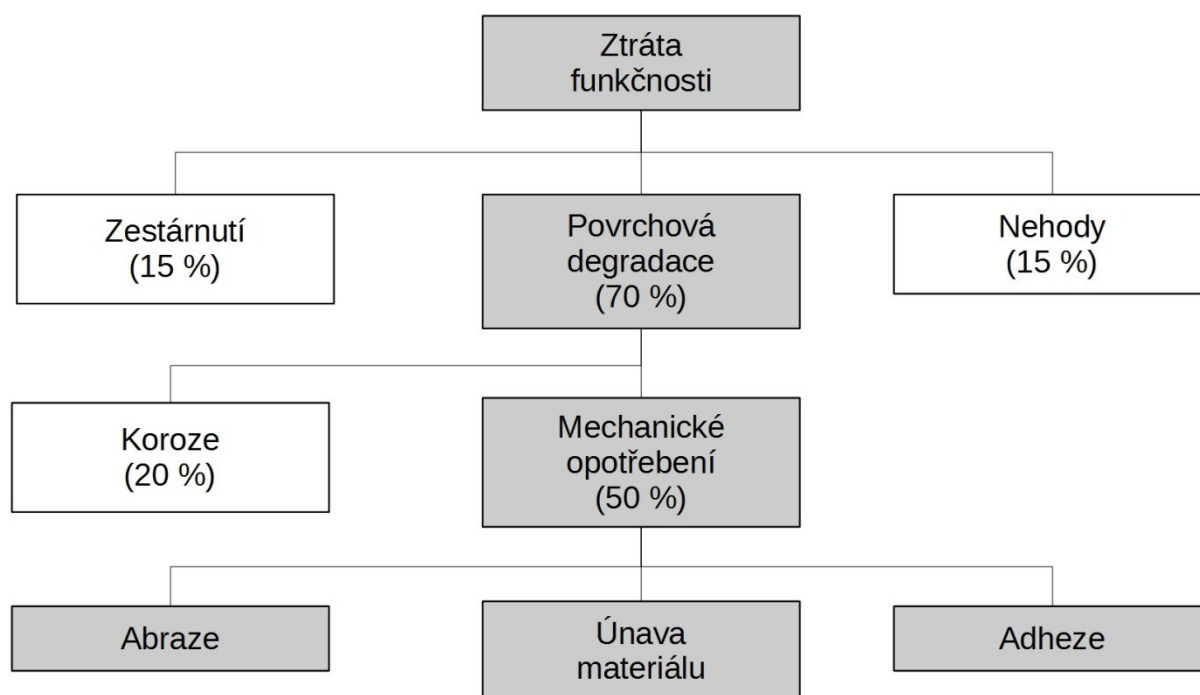
S vývojem kolejnic rovněž úzce souvisel i vývoj materiálů používaných k výrobě železničních kol a samotných kolejnic. Proto je dnes zapotřebí používat takové materiály, které nejvíce vyhovují požadavkům, tzn. vysoké ořezuvzdornosti a pevnosti, z důvodů vysoké životnosti.

Technologie od prvních kol značně pokročila, ne však natolik, aby šlo vše jednoduše určit pomocí základních výpočtů. Jedná se především o kontaktní únavu po miliónech realizovaných cyklů, kdy zkoušky s reálnými koly při zkoumání modifikovaných typů oceli by byly velmi náročné a nerentabilní. Z toho důvodu je při experimentech používáno pouze zjednodušeného modelu kola a kolejnice, který je podroben hlubší analýze v následující kapitole. Aby byly testy korektní a aplikovatelné na různé druhy materiálů, je potřeba zajistit optimální podmínky po celou dobu realizace testu s uvážením počátečních rozměrů vzorků, maximálního tlaku a skluzu.

V praxi nebývá problém dodržet v průběhu testu konstantní skluz s ohledem na měnění se průměr vzorků. Problémem je zachování konstantního kontaktního tlaku, který se vlivem plastické deformace obou vzorků mění, kdy může docházet k jeho progresivnímu nárůstu či poklesu. Cílem této práce je navrhnout metodiku zkoušek odolnosti proti opotřebení dle normy AAR M-101, která do jisté míry dovoluje úpravu metodiky těchto zkoušek. Nutno podotknout, že při měření míry opotřebení podle originálního znění normy je přítlak 319 500psi (2 202MPa), skluz 0,75% s dobou trvání 500 000 cyklů.

2 Opotřebení

Opotřebení vzniká při vzájemném působení funkčních ploch a je nežádoucí. Maximální opotřebení respektive ztráta funkčnosti, je stav ohrožující další provozování součástí. Hlavním podílem na ztrátě funkčnosti je ze 70 % povrchová degradace. Mechanické opotřebení se řadí pod povrchovou degradaci a zapříčiní 50 % případů ztráty funkčnosti. V případě kontaktu kolejnice a železničního dvojkolí jsou hlavními činiteli abraze, adheze a únava materiálu, viz Obr. 1. Dalšími typy jsou erozivní, kavitační či vibrační opotřebení, které se však v takovém rozsahu na železnici nevyskytují.



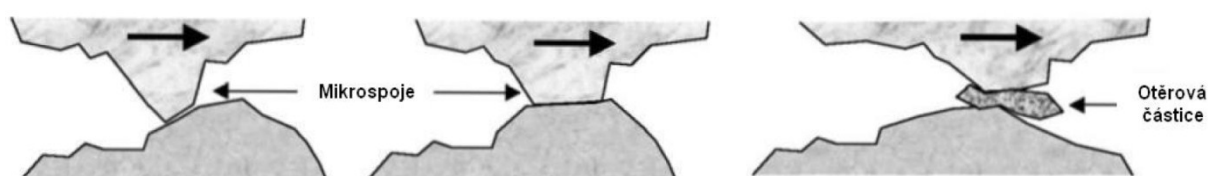
Obr. 1 – Schéma rozdělení ztráty funkčnosti ⁴

Mechanické opotřebení se rovněž objevuje i na jiných součástech jako jsou ložiska, vačky, různé druhy mechanických a hydraulických převodovek a dalších součástí kolejových vozidel. Tento druh opotřebení je samozřejmě nežádoucí a může vyústit v havárii s fatálními následky. Míru opotřebení ovlivňuje řada vlivů, jmenujme například strukturu materiálu, topografii povrchu, provozní a klimatické podmínky apod.

2.1 Adhezivní opotřebení

Adheze je specifikována jako přilnavost dvou materiálů respektive jako přenos tečných sil mezi povrchy bez vzájemného pohybu. Adhezivní opotřebení je oddělování a přemísťování částic kovu vlivem tečných sil, které vznikají mezi dvěma tuhými tělesy. Vlivem přitažlivosti

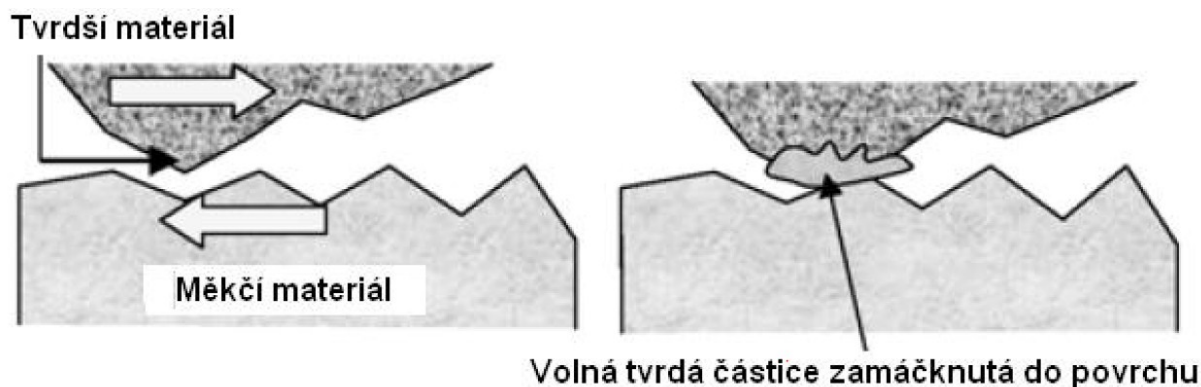
mezi atomy vznikají na nerovnostech mikrospoje. Jakmile dojde k překročení pevnosti u těchto mikrospojů, tak se spoj přetrhne. Následným pohybem dochází k přemísťování částic kovu. Schéma adheze je vyobrazeno na Obr. 2. Na vznik, rozsah a průběh má vliv především poloměr zakřivení funkčních povrchů, hloubka mikronerovností na povrchu a v neposlední řadě také normálová síla, respektive třecí síla, s kterou adhezivní opotřebení roste. Za předpokladu velkého pohybu otěrových částic dojde k výraznému zkrácení životnosti. Naopak, k prodloužení životnosti a snížení opotřebení je žádoucí vhodná volba obou materiálů, které jsou ve vzájemném kontaktu, případně povrchové mazání, pokud to dovolují okolní podmínky. Součinitel opotřebení vyjadřující pravděpodobnost působení mezi nerovnostmi povrchu, s jehož hodnotou roste i velikost opotřebení, je u měkkých ocelí cca $10^{-2} \frac{1}{Pa}$ a koeficient tření 0,6.



Obr. 2 – Princip adheze ¹⁴

2.2 Abrazivní opotřebení

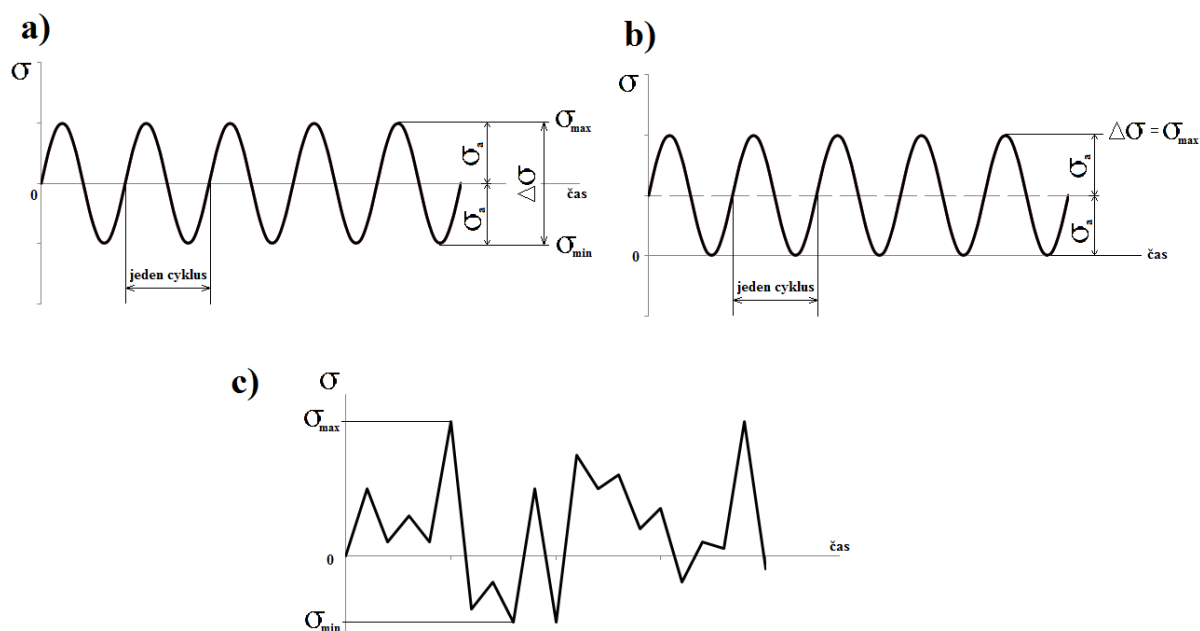
Abrazivním opotřebením se rozumí obrušování jednoho povrchu respektive nerovností povrchu druhým povrchem. Obrušování je zapříčiněno rozdílnou tvrdostí jednotlivých povrchů, tvrdší povrch obrušuje povrch měkkší. K obrušování dochází na povrchových nerovnostech nebo při přítomnosti volných částic v místě styku, viz Obr. 3. Nejčastějším typem abrazivních částic jsou částice prachové, písek, odlomené kusy jednoho z povrchů apod. Na rozdíl od adheze, v tomto případě nezáleží pouze na normálové síle, ale také na členitosti povrchu, velikosti výstupků respektive drsnosti povrchu. Životnost povrchu je především ovlivněna jeho povrchovou úpravou, tvrdostí obou ploch a množstvím částic, které se mohou shlukovat. Tentýž efekt mají velké částice, které jsou rozměrově větší než případná vůle. Tvar těchto částic je ovšem také nezanedbatelný, čím ostřejší povrch, tím vyšší míra opotřebení.



Obr. 3 – Princip abraze ¹⁴

2.3 Únava materiálu

Únava materiálu vzniká vlivem cyklického namáhání součástí a kumulací tohoto namáhání. Cyklické namáhání může mít různý charakter zatěžování, viz Obr. 4.



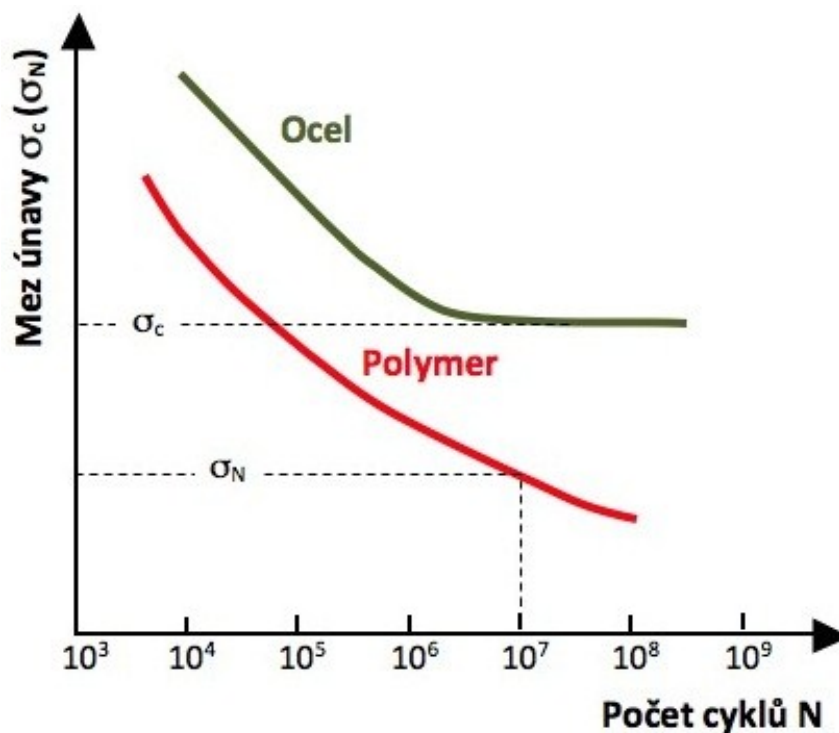
Obr. 4 – Způsob zatěžování a) střídavé, b) mívivé, c) stochastické

Cyklické napětí musí být menší hodnoty, než je mez pevnosti daného materiálu. Avšak poškození může vznikat při napětích menších, než je mez kluzu. Při cyklickém namáhání dochází ke vzniku malých trhlin, které rostou do doby, než dojde k lomu a poškození součásti.

Vznik únavových trhlin záleží na mnoha faktorech, jako je tvar, povrchová úprava, způsob zatížení a odolnost materiálu. Velký vliv má také způsob výroby a její technologie.

Hlavní křivkou popisující únavu materiálu je Wöhlerova křivka, znázorněná na Obr. 5. Tato křivka je dále pomyslně rozdělena na oblast od 0 do cca 10^3 cyklů, kde se jedná

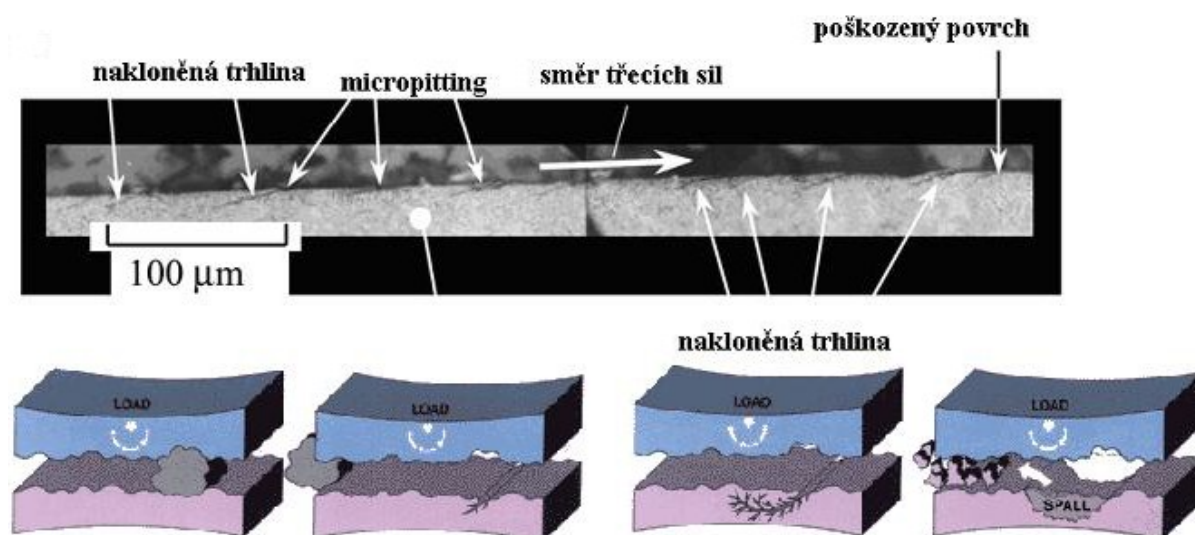
o kvazistatický lom, od 10^3 do 10^5 cyklů se jedná o nízkocyklovou únavu, od 10^5 do 10^7 se jedná o vysokocyklovou únavu a od 10^7 se jedná o trvalou únavovou pevnost. Na Obr. 5 je také znázorněn polymer σ_N což označuje časovou mez únavy, zatímco σ_c znázorňuje mez únavy. V případě, že je maximální napětí menší než mez únavy, pak má součást neomezenou životnost (platí pro ocel).



Obr. 5 – Wöhlerova křivka ²

2.4 Vznik trhlin

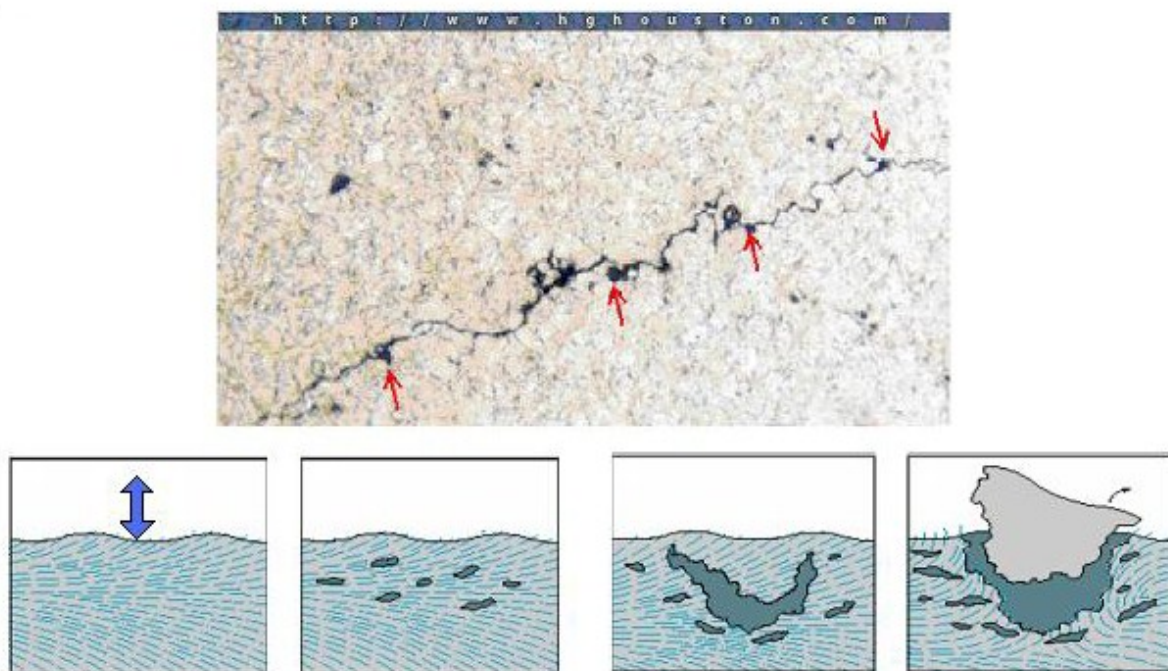
Povrch může obsahovat nerovnosti a trhliny zapříčiněné slabou tloušťkou materiálu, působením tvrdých a velkých částic, anebo nedokonalostí materiálu. Při nedostatečném mazání a velké drsnosti povrchu dochází při kontaktu k tvorbě rýh. Tyto rýhy působí jako koncentrátoři napětí, ze kterých se dále šíří trhliny. Schéma iniciace trhlin těsně pod povrchem je znázorněno na Obr. 6.



Obr. 6 – Vznik trhliny povrchových trhlin¹²

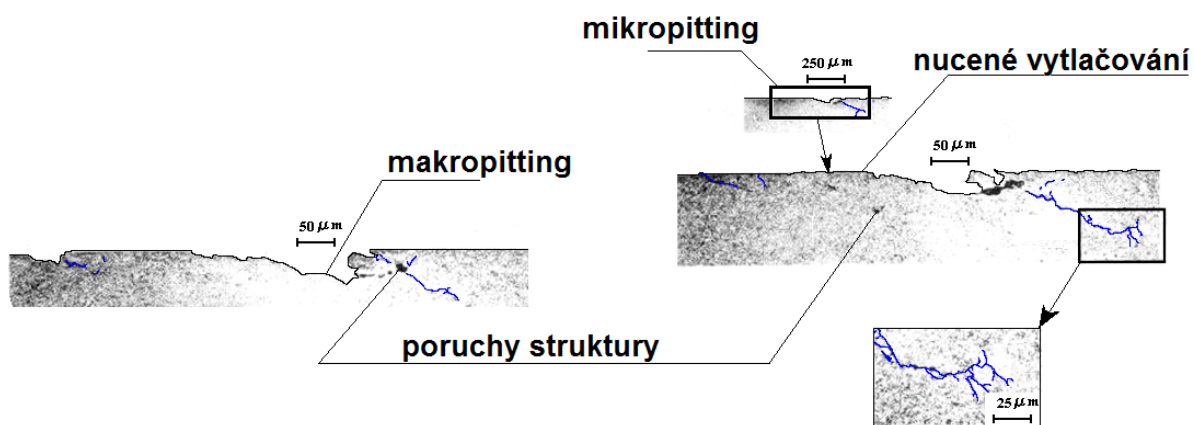
V první fázi vnikne větší částice, původem z abraze, která v důsledku otláčení do materiálu vytvoří trhliny. Při vysokém stupni namáhání se zde uplatňuje Hertzova teorie. Působením napětí dojde k šíření trhliny, díky které se vylomí kus materiálu. Dalším vlivem může být mazivo, které do trhlin vniká a tímto trhlínu rozevívá. Tímto způsobem vznikají trhliny primární. Z těchto primárních trhlin se mohou iniciovat trhliny sekundární či se spojit s podpovrchovými trhlínami.

Ač vypadá povrch jakkoliv, pod povrchem je vznik trhlin možný. Nedochází tedy pouze ke vzniku povrchových trhlin, nýbrž vlivem napětového přerozdělení uvnitř materiálu a nehomogenit rovněž ke vzniku podpovrchových trhlin. Hranice mezi dislokačními buňkami se protahují ve směru namáhání a vznikají v nich dutiny. Kromě těchto dutin zapříčiňují trhliny i vměstky a nedokonalosti materiálu. Na Obr. 7 je znázorněn průběh vzniku podpovrchových trhlin, které se poté rozšiřují a propojují do doby, než dojde k vylomení a následnému uvolnění částice. Vznikající jamky se nazývají pitting.



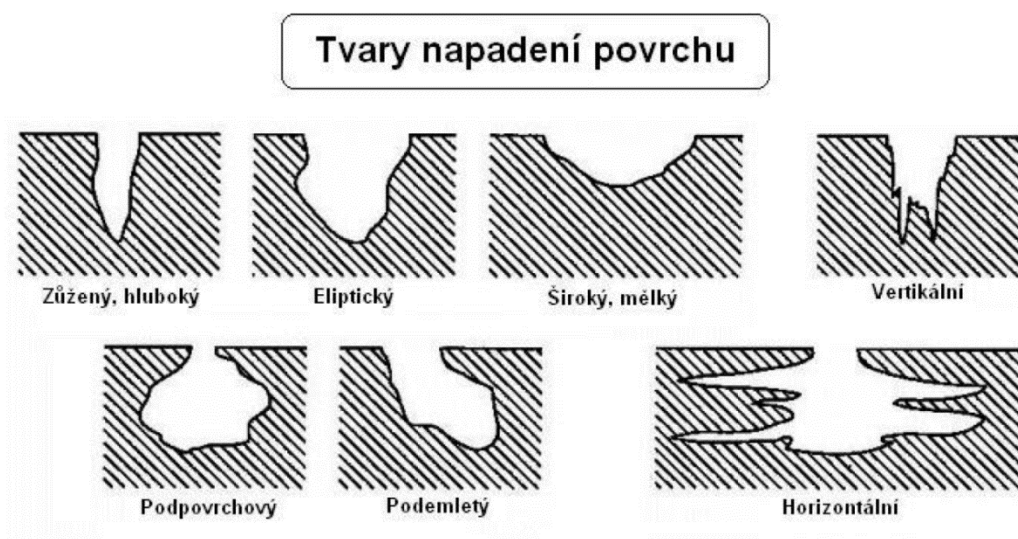
Obr. 7 – Vznik trhliny pod povrchem¹²

Trhliny označované jako pitting jsou tzv. jamková degradace. Při pittingu se vylamují kusy materiálu s lasturovým lomem. Pitting může být dělený podle velikosti na makropitting a mikropitting, viz Obr. 8.



Obr. 8 – Ukázka pittingu¹²

Pitting vznikající při únavě materiálu může mít různý charakter, viz Obr. 9. Na vznik mikrotrhlin, tzv. mikropittingu, mají vliv vměstky, vady materiálu a dutiny, protože fungují jako vrub respektive koncentrátor napětí. Na výsledné opotřebení materiálu má velký vliv i drsnost povrchu a abraze. Pokud se jamky začnou nejenom tvořit, ale i zvětšovat, je v tomto případě pitting nebezpečný a doporučuje se součást vyměnit. Příkladem můžou být ozubená kola v převodovce. Navíc, při přetěžování se povrchové a podpovrchové trhliny rychle šíří.



Obr. 9 – Ukázka tvaru pittingu¹⁴

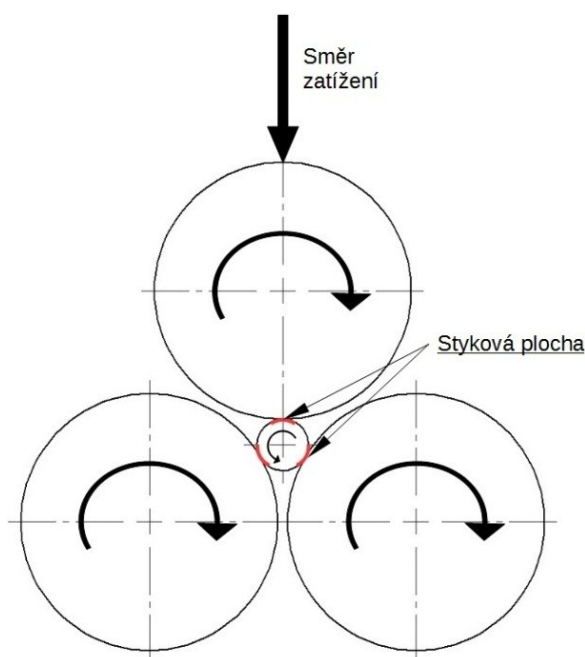
Speciálním případem je vylamování povrchové vrstvy také nazývané spalling. Tento jev je častý u povrchově tvrzených materiálu s malou hloubkou tvrzené vrstvy, jako je povrchové kalení, cementace, nitridace či nitro-cementace. Vylomená povrchová vrstva nemusí mít vždy totožnou hloubku, jakou měla povrchová úprava. Spalling má stejný iniciátor jako pitting, kterým je vysoké cyklické namáhání součásti, který je příčinou vzniku trhlin. Na rozdíl od pittingu se spallingu dá zabránit hlubší povrchovou úpravou, lepší kvalitou povrchu nebo změnou rychlosti pohybu daných součástí.

3 Materiálové zkoušky odolnosti proti kontaktní únavě

V historii bylo navrženo a vytvořeno několik experimentálních zkušebních strojů, které testují kontaktní únavu pomocí kuličkových nebo diskových systémů se zatížením a pracují na principu bodového respektive liniového styku, případně i styku plochou. Hlavním cílem těchto zkušebních zařízení je přiblížit se co nejvíce reálným provozním podmínkám v běžných aplikacích. Podmínky jsou avšak kladeny na jednoduchost, opakovatelnost zkoušek a malou finanční náročnost. Dřívější zařízení pro zkoumání kontaktní únavy byla v tomto směru omezená. V následujících podkapitolách budou přiblíženy nejvíce používané přístroje pro zkoušky kontaktní únavy.

3.1 Micro Pitting Rig (MPR)

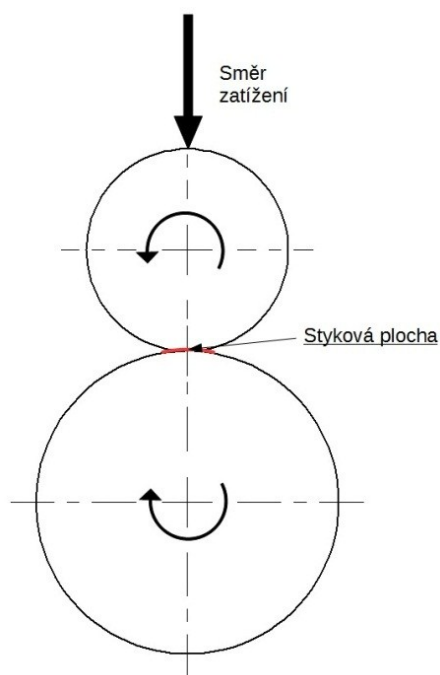
Zařízení MPR se skládá ze tří velkých kotoučů, které vyvozují na vzorek kontaktní tlak s liniovým stykem. Kotouče jsou rozmístěny po 120° a na horní kotouč je vyvozena tlaková síla, viz Obr. 10. Vzorek je umístěn uprostřed mezi kotouči. Toto uspořádání umožňuje vystavení vzorku velkým počtům cyklů v krátkém časovém úseku. Při rychlosti otáčení $3,5\text{m/s}$, je možno vyvodit cca jeden milión cyklů za hodinu. U zařízení je automaticky regulována rychlost, skluz, teplota, zatížení a případně i množství dodaného maziva. Testovací zařízení umožňuje zkoumat vliv maziva, zatížení nebo skluzu na mikropitting a makropitting.



Obr. 10- Schéma MPR přístroje

3.2 Twin-Disk test

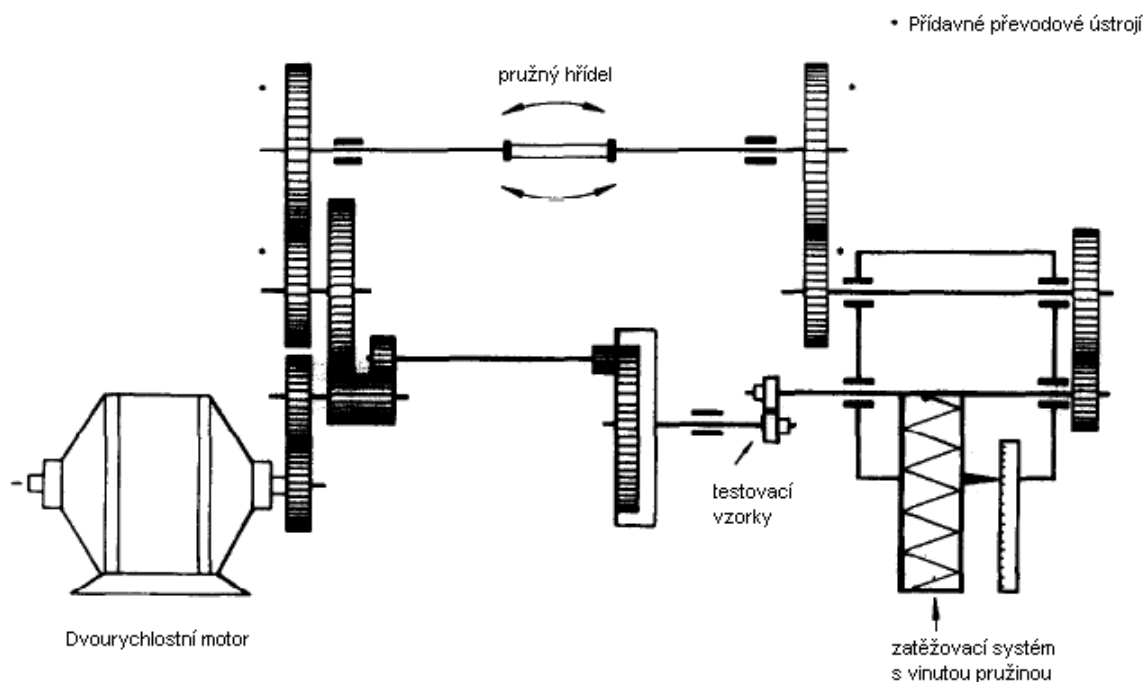
Twin-disk test se skládá ze dvou disků, které se po sobě odvalují, viz Obr. 11. Zatížení vyvoluje liniový styk v případě rovných kotoučů nebo bodový styk v případě vzorku se zaoblením. V případě použití dvou nezávislých pohonů je možno řídit plynule prokluz. Další možností je použití maziva či jiné tekutiny v místě styku pro simulaci reálných podmínek.



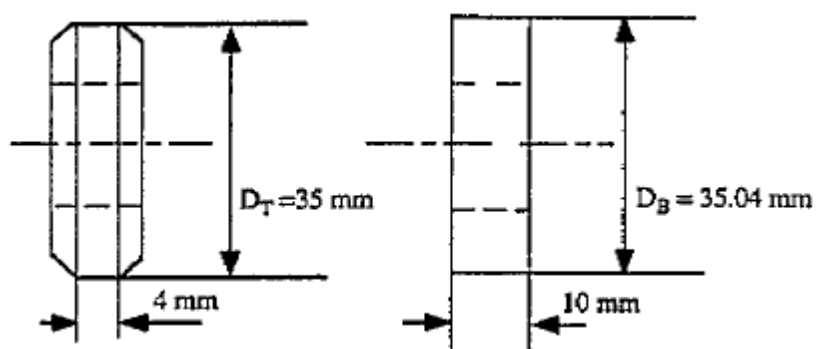
Obr. 11 – Schéma přístroje

3.2.1 AMSLER

AMSLER je původem z Velké Británie. Pro potřeby testů využívá dvourychlostního motoru (200 a 400 ot/min). Jeden motor slouží pro pohon obou hřídelí se vzorky, viz Obr. 12. Na Obr. 13 je poté znázorněna geometrie použitých vzorků. Podle převodového poměru je definován skluz, který může být nulový - volné odvalování. Bohužel při této konfiguraci nelze plynule měnit skluz za chodu stroje. Přítlačná síla je vyvozena vinutou pružinou. Při standardní konfiguraci je schopna dosáhnout až 2000N. Avšak při použití tužší pružiny je přítlačná síla adekvátně větší.



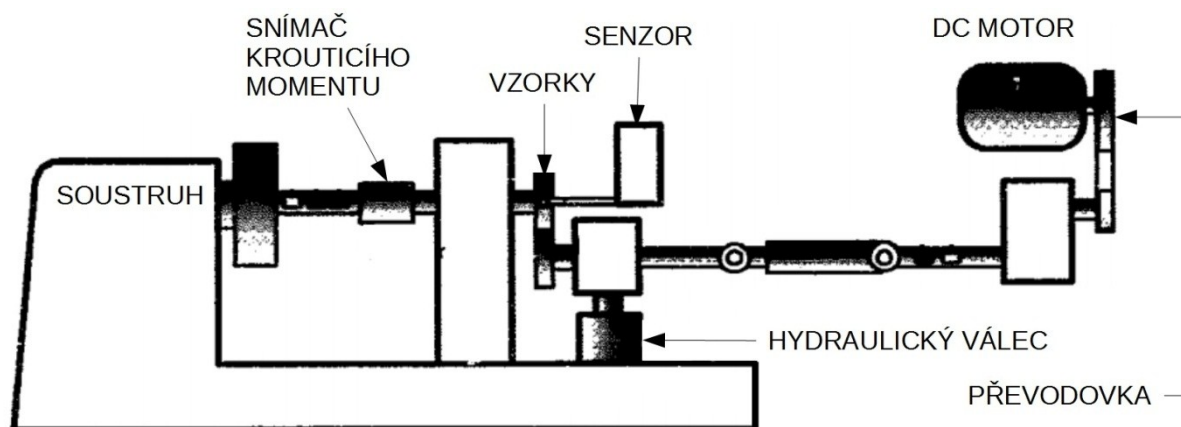
Obr. 12 – Schéma stroje AMSLER¹⁶



Obr. 13 – Geometrické schéma vzorku pro stroj AMSLER¹⁶

3.2.2 LEROS

LEROS (Leicester rolling sliding contact testing machine) je také původem z Velké Británie. Vznikl modifikací soustruhu typu Colchester Mascott 1600. Každý vzorek má vlastní pohon, první vzorek je poháněn pomocí motoru soustruhu, druhý pak pomocí stejnosměrnému motoru o výkonu 4kW, viz Obr. 14. Průměr obou vzorků je 47mm a šířka 10mm. Prokluz je generován rozdílem obvodových rychlostí jednotlivých vzorků, který lze plynule regulovat. Přítlačná síla je vyvozena pomocí hydraulického válce, který může dosáhnout síly až 29kN.



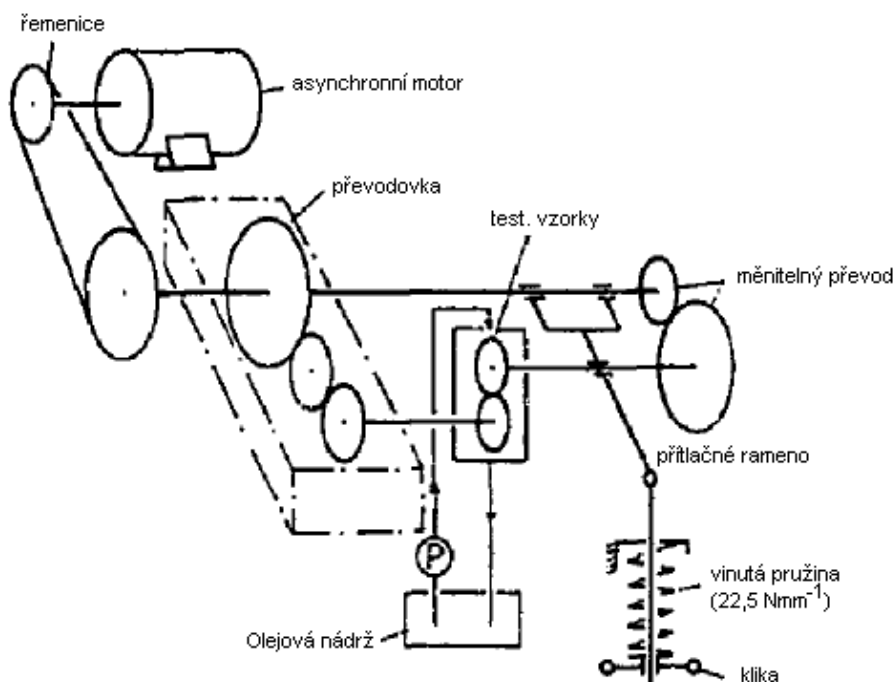
Obr. 14 – Schéma stroje LEROS ¹⁶

3.2.3 SUROS

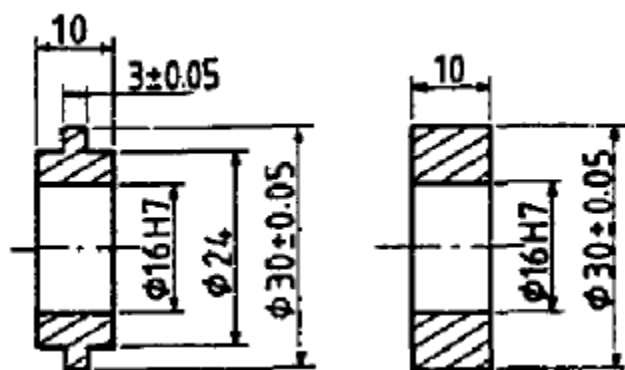
SUROS (Sheffield University rolling sliding contact testing machine) je téměř totožný s předchozím strojem LEROS, avšak místo 4kW stejnosměrného motoru byl použit asynchronní motor o výkonu 7kW.

3.2.4 NISHIHARA

NISHIHARA je stroj původem z Japonska. Tento stroj opět používá pouze jeden asynchronní motor k pohonu obou vzorků, viz schéma na Obr. 15. K prokluzu je použit měnitelný převod, takže není možná plynulá regulace za chodu stroje. Přítlačná síla je vyvozena přes rameno pomocí vinuté pružiny. Geometrie vzorků je zobrazena na Obr. 16.



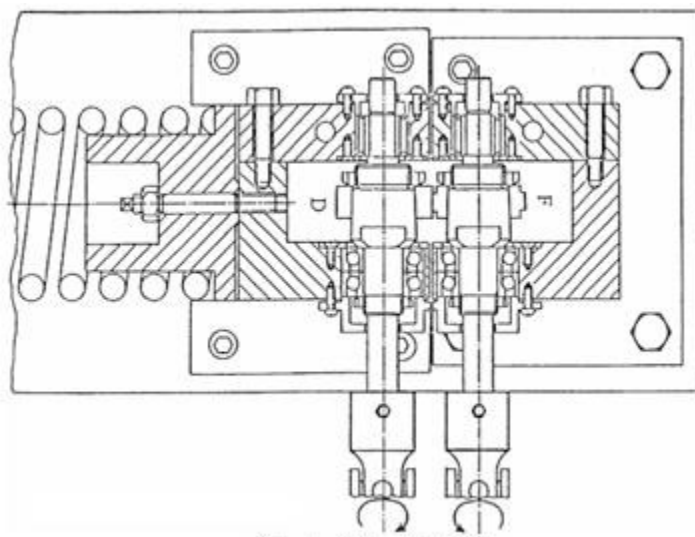
Obr. 15 – Schéma stroje NISHIHARA ¹⁶



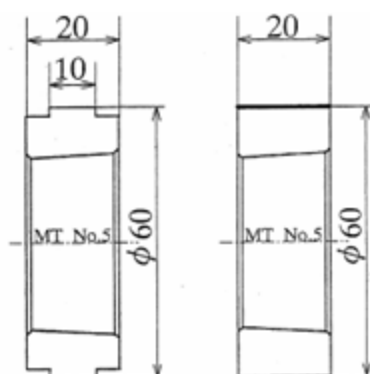
Obr. 16 – Schéma vzorků použitého na stroji NISHIHARA ¹⁶

3.2.5 Two-roller testing machine

Two-roller testing machine je původem z Japonska. Ze zdrojů se nepodařilo dopátrat parametrů stroje. Na Obr. 18 je vyobrazena geometrie obou vzorků. K prokluzu dochází pomocí rozdílných obvodových rychlostí. Přítlačná síla je poté vyvozena pomocí pružiny, která přitlačí část stroje, viz řez strojem na Obr. 17.



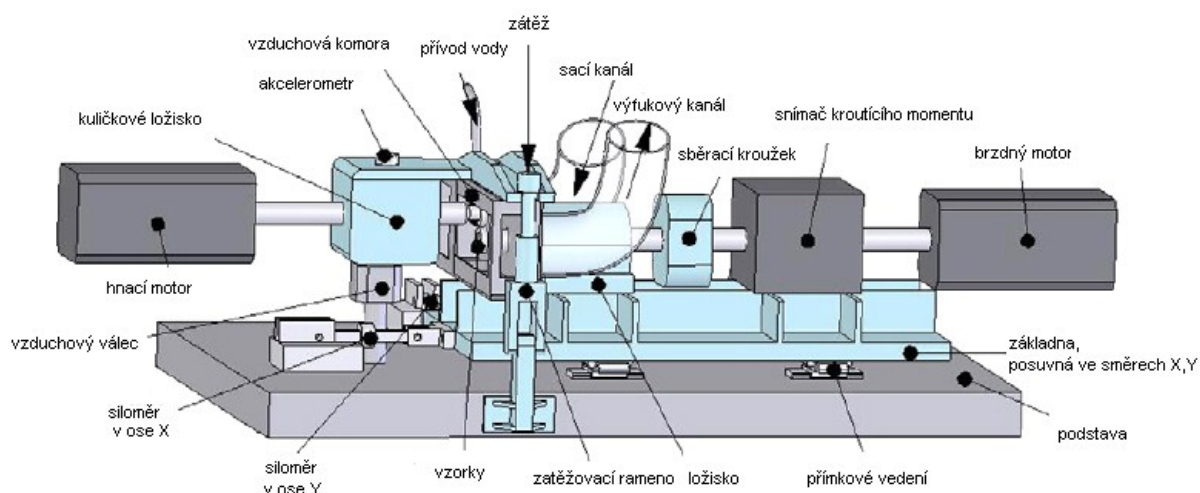
Obr. 17 – Příčný řez strojem ¹⁶



Obr. 18 – Schéma geometrie vzorků ¹⁶

3.2.6 Twin-disc rolling-sliding frictional machine

Twin-disc rolling-sliding frictional machine je původem z Japonska. Pohon je řešen dvěma samostatnými motory o výkonu 2,5kW. Další z možností tohoto stroje je nastavení nesouososti od -3° do $+3^\circ$, čímž lze generovat prokluz. Vzorky jsou umístěny ve vzduchové komoře, což je vhodné pro simulace různé vlhkosti a teploty. Průměr vzorků činí 60mm a jejich šířka je 8mm. Kontaktní plocha vzorku simulujícího materiál kola disponuje poloměrem zaoblení o velikosti 40mm. Prokluz je generován, jak již bylo zmíněno, možnou nesouosostí, přičemž hlavní způsob generace skluzu je v obvodové rychlosti vzorků. Přítlak je vyvozen pomocí vinuté pružiny na zatěžovacím rameni.

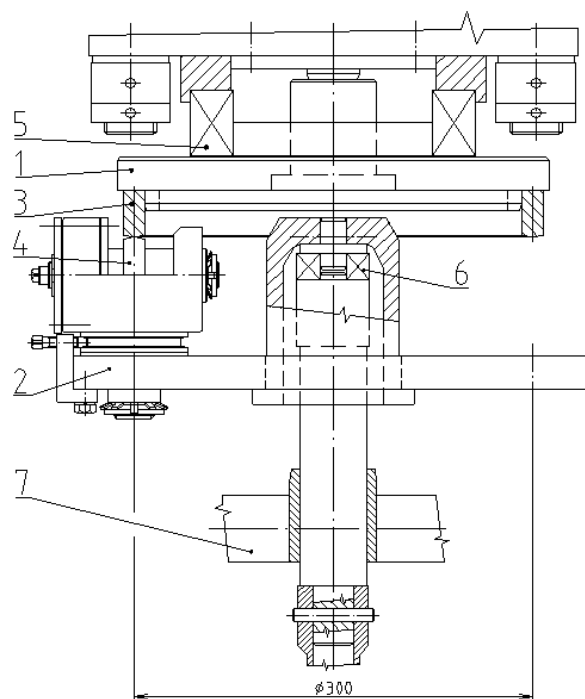


Obr. 19 – Schéma stroje¹⁶

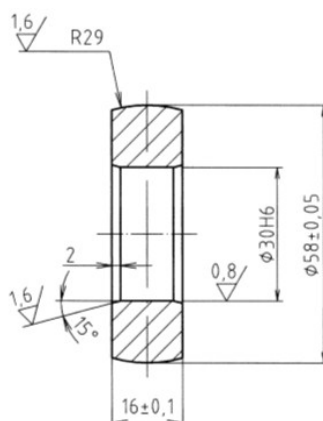
3.2.7 TUORS

TUORS vznikl na VŠB-TU v Ostravě v rámci GAČR 101/99/1245 a CEZ J17/98:272300009. Jedná se o přídavné zařízení k víceosému trhačím stroji INOVA 200kN. Schéma je na Obr. 20 Rotaci zajišťuje horní unášec, který je z materiálu kolejnice, a pohon zajišťuje radiální pístový hydromotor KM 21/21 firmy Düsterloh s maximálním kroutícím momentem 334Nm. Přítlačnou sílu o velikosti až 20kN vyvozuje hydromotor INOVA 200kN, která je přenesena pomocí nosné desky, na niž jsou usazeny 3 kladky s rozstupem 120° . Maximální možný průměr kladky je 59mm. Odvalování je v tomto případě vyvozeno třením mezi vzorky. Vzorky byly navrženy s bombírováním z důvodu realizace bodového styku. Lze použít i vzorky pro liniový styk. K prokluzu dochází pomocí natáčení kladky. Maximálním úhlem natočení kladky je 20° .

- 1 – horní unášeč
- 2 – nosná deska
- 3 – materiál kolejniče
- 4 – kladka
- 5 – přídavné axiální ložisko
- 6 – kulové ložisko
- 7 – pojistný příčník



Obr. 20 – Schéma přídavného zařízení¹⁶



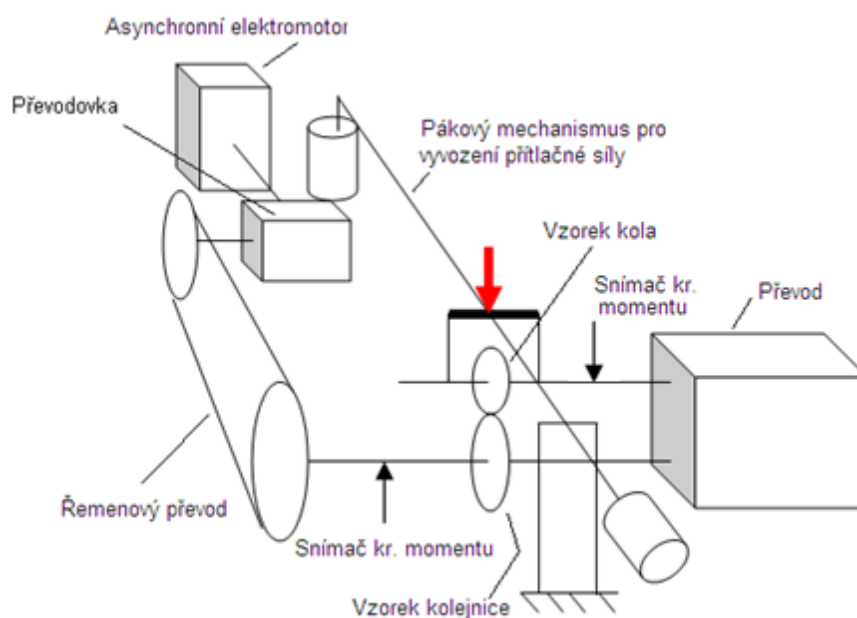
Obr. 21 – Geometrie vzorku¹⁶

3.2.8 TUORS II.

TUORS II vznikl opět na půdě VŠB-TUO, ve spolupráci s firmou Bonatrans Group a.s. se sídlem v Bohumíně. Pohon je řešen za pomoci asynchronního motoru o výkonu 2,2kW. Maximální průměr vzorku simulující kolo je dán konstrukčním omezením stroje a je roven 85mm. Průměr vzorku simulujícího kolejnici je dán omezením stroje a zároveň velikostí vzorku kola. V případě nuceného prokluzu je vhodný maximální průměr 213mm. Jelikož je použit jeden motor, je prokluz v průběhu měření neměnitelný. Změna prokluzu je možná pouze změnou převodového poměru nebo dříve zmíněnou, změnou průměrů obou vzorků. Přítlačná síla je vyvozena závažím na páce. Vzhledem ke konstrukci by neměla přesáhnout 9kN při volném odvalování, v případě prokluzu musí být adekvátně menší.



Obr. 22 – Stroj TUORS II ¹⁶

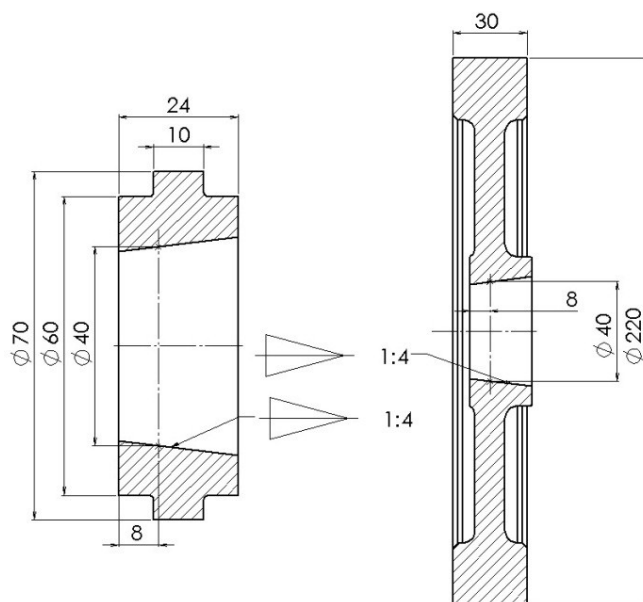


Obr. 23 – Schéma stroje TUORS II ¹⁶

3.2.9 Zařízení firmy Bonatrans Group a.s.

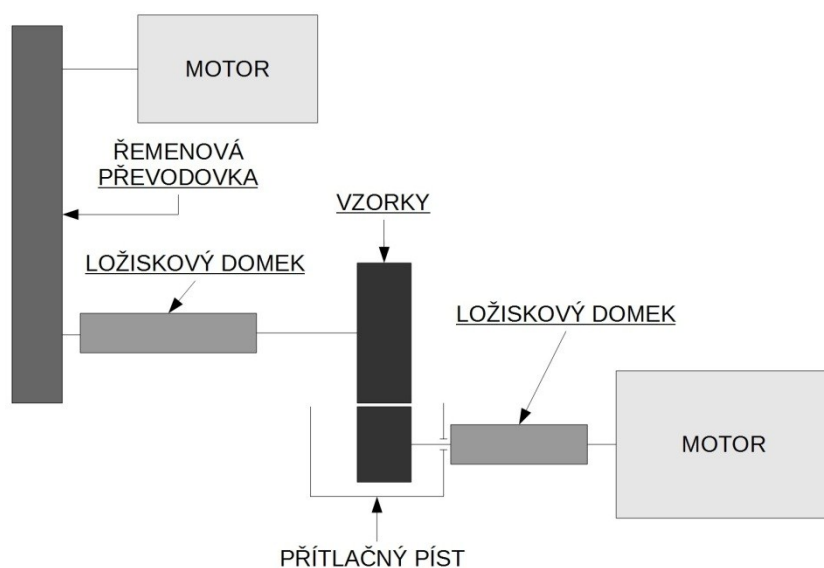
Tento stroj byl sestaven firmou INOVA. Pohon je realizován pomocí dvou motorů WEG Lenze W22 o výkonu 55kW. Prokluz je realizován pomocí rozdílné obvodové rychlosti vzorků. Přitlačná síla je vyvozena pomocí hydraulického válce s omezením na 20kN. Geometrické rozměry vzorku jsou vyobrazeny na Obr. 24, vzorek simulující kolo má 70mm v průměru a počáteční šířku 10mm. Zatímco vzorek simulující kolejnici má počáteční průměr 220mm, který se může zmenšovat vlivem radiálního broušení kvůli recyklaci vzorku pro opětovné použití, šířka zůstává konstantní s hodnotou 30mm. Vzorky jsou uchyceny

pomocí kuželového spoje. Tento způsob uchycení byl navržen z důvodů předchozích poškození hnacího hřídele speciální tvarovou spojkou pro přenos krouticího momentu. Tato spojka byla z materiálu měkčího než samostatná hřídel, přesto došlo k poškození hřídele, nikoliv tvarové spojky.



Obr. 24 – Schéma používaných vzorků

Na Obr. 25 je uvedeno schéma pracovního stroje. Jedná se o relativně jednoduchou konstrukci s dvěma motory, řemenovou převodovkou a ložiskovými domky pro uchycení hřídele. Samozřejmostí, která už není vyobrazena pro přehlednost schématu, jsou senzory pro měření počtu otáček za minutu, krouticího momentu a teploty.



Obr. 25 – Schéma stroje

3.2.10 Shrnutí jednotlivých strojů

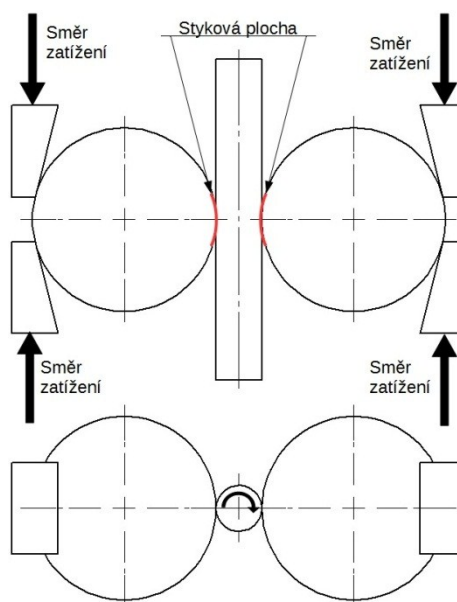
Název zatěžovacího stroje	Pohon, vyvození prokluzu	Vyvození tlaku (přítlačné síly)
AMSLER	Pohon je řešen jedním elektromotorem. Prokluz je zajištěn pomocí převodovky a různých obvodových rychlostí, prokluz nelze měnit plynule.	Síla je vyvozena pomocí kompresní pružiny, která je nastavitelná až na hodnotu 2kN, v případě výměny pružiny může být mezní hodnota vyšší.
LEROS	V tomto případě jsou použity dva elektromotory, tudíž prokluz lze řídit plynule. Jeden motor je součástí soustruhu a druhý je dodatečný stejnosměrný motor o výkonu 4kW.	U zařízení LEROS byl použit pro vyvození síly hydraulický válec, který může vyvodit sílu o velikosti až 29kN.
SUROS	Jedná se o téměř totožné zařízení jako LEROS, ale s rozdílným přídatným elektromotorem. Stejnosměrný motor byl nahrazen asynchronním motorem o výkonu 7kW.	
NISHIHARA	U tohoto zařízení byl opět použit jeden elektromotor s převodovkou, která zajišťuje rozdílné obvodové rychlosti, a tudíž nelze realizovat plynulé řízení prokluzu.	Zde je použita vinutá pružina, a tudíž přítlačná síla závisí na tuhosti pružiny.
Two-roller testing machine	I zde se jedná o obdobu předchozích zařízení, jelikož je zde použit pouze jeden elektromotor, nelze prokluz plynule řídit.	Použitím vinuté pružiny je v tomto případě tlak vyvíjen na celou hřídel se vzorkem včetně ložiskových domků, které přítlačuje části vzorku na hřídeli.

Twin-disc rolling sliding frictional machine	Toto zařízení používá dva servomotory o výkonu 2,5kW. Jelikož používá dva motory, lze řídit prokluz plynule za chodu. Navíc je možno řídit prokluz pomocí nastavitelné nesouososti od -3° do $+3^\circ$.	I tady bylo použito rameno s vinutou pružinou pro vyvození přitlačné síly.
TUORS	Jelikož se jedná o přípravek k trhacímu stroji, zajišťuje rotaci radiální hydromotor. Prokluz se řídí pomocí natočení kladky.	Přítlak o síle až 20kN je vyvozen pomocí horního unášeče.
TUORS II	Pohon je zde řešen jedním motorem, který přes převodovku pohání druhý vzorek, skluz tedy není možné regulovat plynule.	Zde bylo použito rameno, které slouží jako pákový převod, s maximální silou 9kN.
Zařízení ve firmě Bonatrans Group .a.s	Zde je pohon řešen pomocí dvou samostatných elektromotorů, každý s výkonem 55kW .	Přítlačení je zde realizováno podobně jako u zařízení LEROS, avšak omezení je na 20kN.

Tab. 1 – Shrnutí jednotlivých strojů twin-disk testu

3.3 Stationary Element Rolling Contact (SERC)

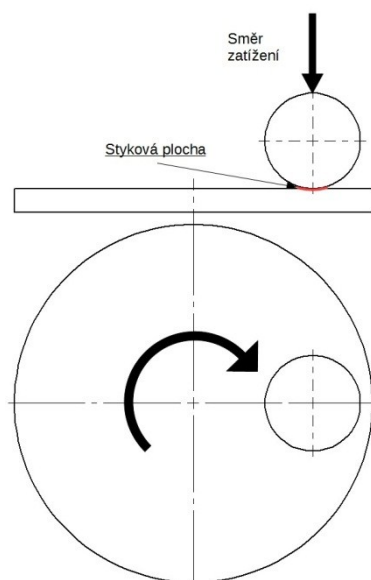
Zařízení funguje na principu bodového styku mezi tuhými kuličkami a válcovitým vzorkem. Zatížení je aplikováno přitlačením členů k sobě pomocí hydrauliky, pneumatiky či pružin a pomocí úkosu přitlačení kuliček na vzorek. Tvar vzorku je jednoduchý na výrobu, další výhodou je použití jednoho vzorku na více souběžných testů při jeho dostatečné délce. U této metody je nicméně špatně aplikovatelný prokluz. Další podrobnosti viz [1]. Schéma je vyobrazeno na Obr. 26.



Obr. 26 – Schéma přístroje

3.4 Ball on Disk test

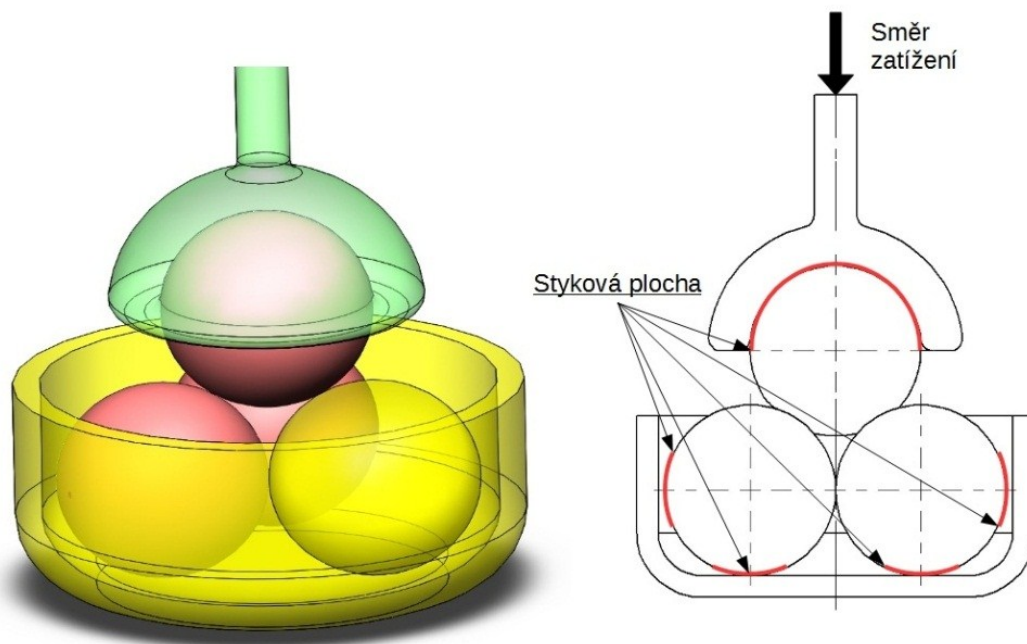
V tomto případě je síla vyvozena pomocí kuličky (soudečku), přitlačované ke kruhové desce. Jelikož kulička není připevněna staticky, ale pomocí nezávislého pohonu, lze řídit i prokluz, případně může docházet k pouhému odvalování po desce. Jelikož lze na desku jednoduše aplikovat povrchové vrstvy, nabízí se možnost testování mechanických vlastností materiálu s povrchovou úpravou.



Obr. 27 – Schéma přístroje

3.5 Rolling Contact test

Tato metoda vznikla ve Velké Británii ve třicátých letech 20. století. Zatížení je aplikováno přes horní kuličku. Dolní tři kuličky mohou být ponořeny do maziva. Každá kulička má průměr $\frac{1}{2}$ palce. Test se přerušuje na základě vyhodnocení vibrační snímačem, jakmile začíná vznikat významná trhlinka. Kulička se poté nahradí a test může pokračovat. Tento typ testování je vhodný spíše pro simulaci podmínek uvnitř valivého ložiska. NASA používá obdobný test, avšak za použití pěti kuliček.



Obr. 28 – Schéma přístroje

3.6 Srovnání jednotlivých zařízení

V následující Tab. 2 jsou porovnávány jednotlivé typy zařízení a jejich výhody a nevýhody. Hodnocení v tabulce je značeno pomocí jednoho až tří znaků +. Kdy jeden znak znamená nesplnění podmínek, dva znaky znamenají plnění za použití modifikací a tři znaky znamenají, že stroj splňuje daný požadavek.

	Micro pitting rig	Twin-disk test	Stationary element rolling contact	Ball on disk	Rolling contact test
Vysoké otáčky	+++	+++	+++	+++	++
Simulace prokluzu	+++	+++	++	++	++
Vysoká zatížení	+++	+++	++	+++	+++
Různý směr zatížení	++	++	++	+	+++
Různá geometrie vzorku	++	+	+	+++	+++
Nízké náklady na výrobu	+++	+	+++	+	+
Různé režimy mazání	++	+++	+	+++	+++

Tab. 2 – Srovnání jednotlivých zařízení

Z provedené rešerše vyplývá, že twin-disk test je velmi vhodný k testování odolnosti proti opotřebení resp. k testování kontaktní únavy. Nevýhodu můžeme nalézt v omezené možnosti změny geometrie vzorku, která je předem daná. Lze pouze v omezené míře měnit šířku a průměr. Profil kontaktní plochy se z důvodu složitosti výpočtu kontaktního tlaku nedoporučuje měnit.

4 Porovnávací zkoušky

Pro porovnávací zkoušky bylo vybráno, dle možností firmy Bonatrans Group a.s., testovací zařízení Twin-disk test, přičemž jeho vlastnosti byly popsány v kapitole 2.2.9, včetně rozměrů jednotlivých použitých vzorků.

4.1 Materiál pro zkoušky

Materiál použitý pro vzorek simulující kolejnici byla kalená ocel typu Class C dle normy AAR M107, která specifikuje pouze chemické složení a tvrdost. Pro materiál simulující kolo bylo použito dvou materiálů - již zmíněná ocel Class C a ER7 dle ČSN EN 13262. Tato norma mimo jiné určuje materiálové vlastnosti jako je Youngův modul, Poissonovo číslo i mez pevnosti. Chemické složení obou materiálů tak jak jej předepisují normy, jsou uvedeny v Tab. 3.

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Mo	Ni	V
Class C	0,77	1,00	0,90	0,03	0,040	0,25	0,35	0,10	0,25	0,04
ER7	0,52	0,40	0,80	0,02	0,020	0,30	0,30	0,08	0,30	0,06

Tab. 3 – Chemické složení materiálů

4.2 Naměřené parametry jednotlivých vzorků

Před samostatným testováním vzorků vždy došlo k měření důležitých rozměrů vzorku, jako je průměr pro výpočet skluzu, šířka kontaktní plochy menšího vzorku, drsnost povrchu a v neposlední řadě tvrdost, která má podstatný vliv na opotřebení povrchu.

Veškeré naměřené hodnoty pro tyto veličiny a pro všechny použité vzorky jsou uvedeny v přílohách. V příloze 1 až 3 jsou naměřené tvrdosti, v příloze 4 až 10 jsou uvedeny rozměrové hodnoty včetně drsnosti. Příloha 11 vyobrazuje naměřené úbytky průměru a hmotnosti vzorků simulujících kolejnici. V Tab. 4 jsou uvedeny dvojice jednotlivých vzorků použitých pro samostatné testování, které bude v následujících kapitolách detailně představeno. V této tabulce jsou uvedeny kromě dvojic - vzorek kola/vzorek kolejnice i míra skluzu mezi jednotlivými vzorky. U některých vzorků simulujících kolejnici, označených jako velké kolo, je napsáno „zbrušeno“, což udává, že tyto vzorky byly recyklovány pro další použití. Samostatná recyklace vzorků spočívala ve zbrúšení kontaktní plochy o takovou hodnotu, aby byla odstraněna lokálně zpevněná materiálová vrstva. Tento fakt je vidět

i v přílohách, kde počáteční průměr vzorku simulujícího kolejnici, byl menší než ostatní používané vzorky.

Class C/Class C			ER7/Class C		
malé kolo	velké kolo	skluz	malé kolo	velké kolo	skluz
2	6	2%	5	4	1%
3	7	2%	6	5	1%
5	8 (zbroušeno)	0,6%	7	8	2%
6	9	2%	8	1	2%
7	9 (zbroušeno)	1%	10	1 (zbroušeno)	0,6%
9	11	2%	12	13	2%
10	12	2%			

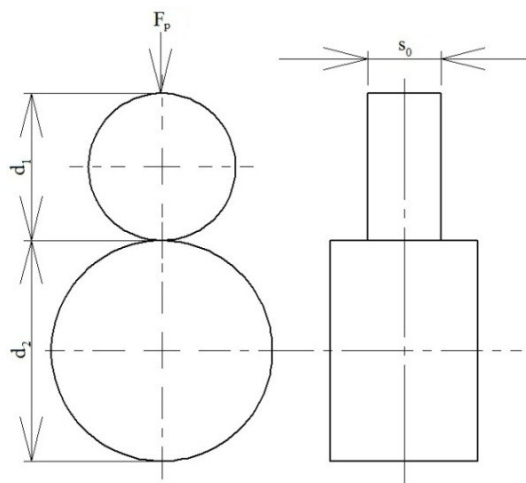
Tab. 4 – Informace, týkající se vzorků včetně hodnot skluzů

4.3 Výpočet přítláčné síly

Výpočet přítláčné síly pro počáteční podmínky vychází z Hertzovy teorie pro liniový kontakt, viz vzorec (1). Jednotlivé neznámé jsou poté znázorněny na Obr. 29,

$$F_p = 0,5 \cdot \left(\frac{p_0}{0,59} \right)^2 \cdot \frac{d_1 \cdot d_2}{d_1 + d_2} \cdot \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right) \cdot s_0, \quad (1)$$

kde s_0 [mm] je počáteční šířka menšího vzorku simulujícího kolo, d_1 a d_2 jsou průměry v milimetrech, jež jsou důležité pro výpočet jak počáteční síly F_p [N], tak i pro výpočet skluzu. Další proměnné jsou E_1 a E_2 [MPa] - Youngův modul a p_0 [MPa] - maximální kontaktní tlak.



Obr. 29 - Schéma

Dle Hertzovy teorie pro liniový styk byla spočtena přitlačná síla pro maximální kontaktní tlak p_0 . Prokluz je rozdíl obvodových rychlostí jednotlivých vzorků.

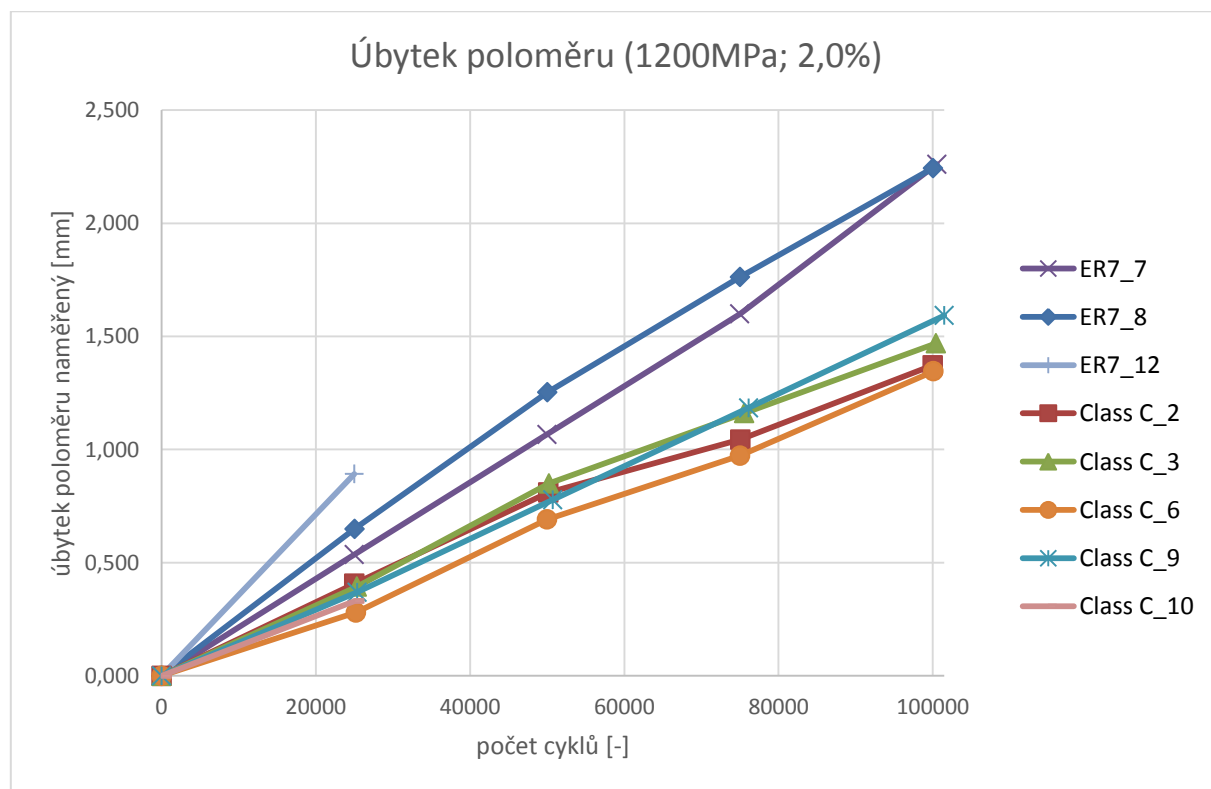
4.4 Naměřené výsledky

Počáteční Hertzův tlak byl zvolen o velikosti 1200MPa, s ohledem na možnosti stroje, a skluz 2 %. Každých 25 000 cyklů byl test zastaven a síla vypočtena ze vzorce (1) byla zkorigována dle aktuálních rozměrů podle vzorce (2).

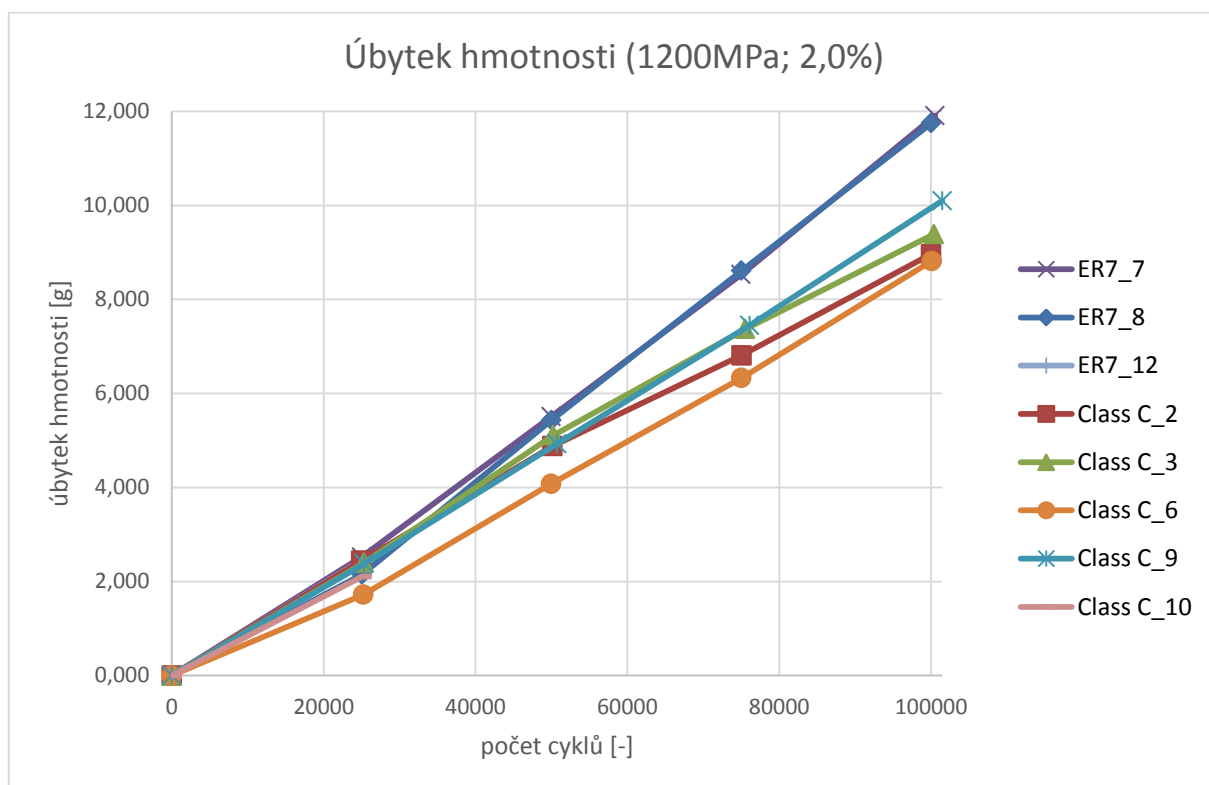
$$p = 0,59 \sqrt{\frac{2 \cdot F_p}{s \cdot \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2}\right) \cdot \frac{d_1 \cdot d_2}{d_1 + d_2}}}, \quad (2)$$

kde s [mm] je aktuální šířka menšího vzorku simulujícího kolo, hodnoty d_1 a d_2 [mm] jsou průměry kol. Ostatní hodnoty jsou stejně jako v předchozím vzorci (1), tedy E_1 a E_2 [MPa] a p [MPa]. Poslední proměnnou je F_p [N], kterou budeme potřebovat pro vyvození již zmíněného maximální kontaktního tlaku, který musí figurovat jako konstanta.

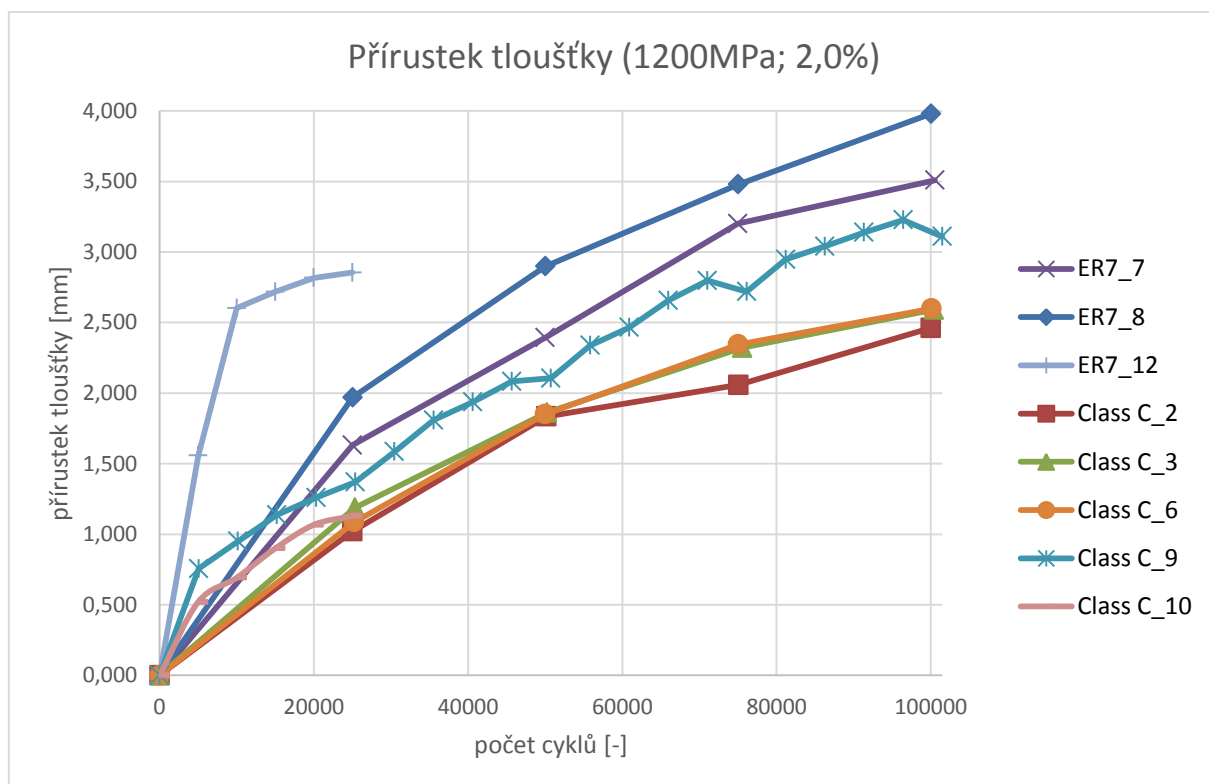
Úbytek hmotnosti je vyobrazen na Obr. 31, úbytek poloměru na Obr. 30 a přírůstek tloušťky na Obr. 32. V přílohách 12 až 17 jsou uvedeny výsledky pro skluz 1 % a 0,6 %.



Obr. 30 – Naměřený úbytek poloměru v závislosti na počtu cyklů



Obr. 31 – Naměřený úbytek hmotnosti v závislosti na počtu cyklů

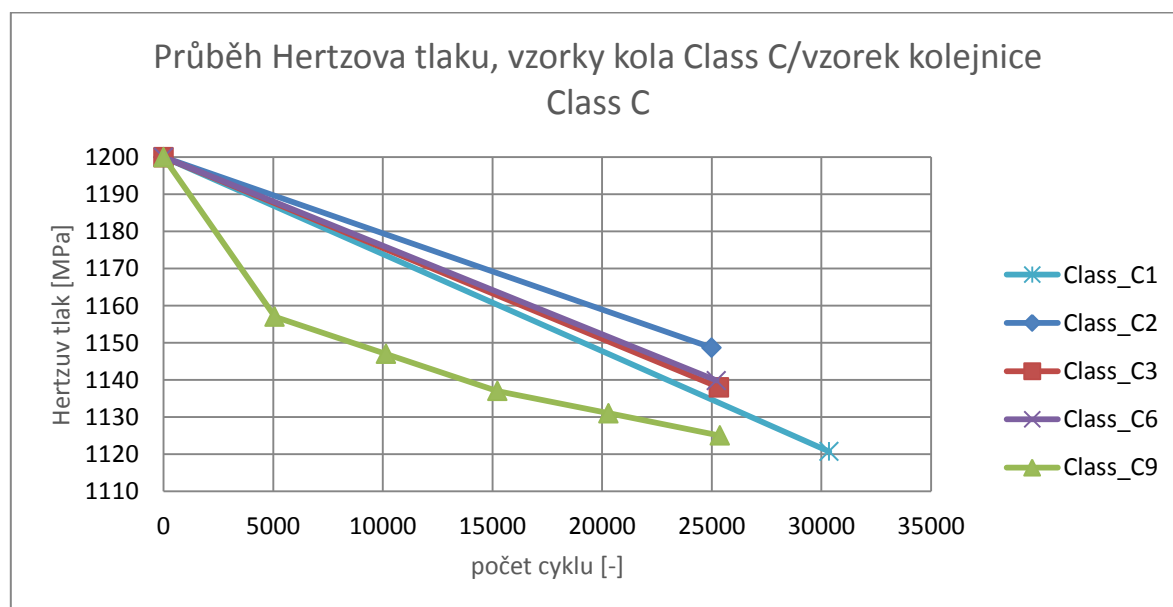


Obr. 32 – Naměřený přírůstek tloušťky v závislosti na počtu cyklů

Z grafu jsou zřejmé rozdíly ve výsledcích mezi vzorky z materiálu Class C a vzorky z materiálu ER7. Co se týče úbytku poloměru a úbytku hmotnosti, mělo zastavování a znovu spouštění testu za účelem měření šířky vzorku minimální vliv – viz vzorky ER7_12 a Class_C_10 a hlavně tedy Class_C_9 (Obr. 30-32). Tyto vzorky byly zastaveny každých 5000 cyklů pro změření aktuální šířky vzorku, důvod zastavování je popsán v následující kapitole. U vzorku ER7_12 je viditelná výrazná odchylka od ostatních vzorků co se týče přírůstku šířky, která však není způsobena častějším zastavováním, nýbrž zvýšenou abrazí. Totožné chování se objevilo u vzorku Class_C_9, ale zde nebyla odchylka tak výrazná. Vzorky Class_C_10 a ER7_12 byly zaznamenány pouze do 25 000 cyklů. Jelikož následně neproběhla korekce tlaku tak, jako u ostatních vzorků, tudíž jsou výsledky neporovnatelné.

4.5 Změna Hertzova tlaku

Při realizaci zkoušek byl nárůst přitlačné síly značný. Korigovaná přitlačná síla se stanovovala na základě měření šířky vzorku za předpokladu, že je délka kontaktní úsečky shodná s šířkou vzorku. Pro tlak 1200MPa, skluz 2 % a materiál kola Class C byl sestaven graf, uvedený na Obr. 33. Hodnoty byly dopočteny pomocí vzorce (2), kde byly použity počáteční hodnoty přitlačné síly a průměrů obou vzorků pro dané zkoušky, pouze se měnila šířka vzorku podle naměřených dat. Ukázalo se, že změna průměru měla minimální vliv na změnu hodnoty kontaktního tlaku. Vzorek č. 9 (viz Tab. 4) vykazoval po 25 000 cyklech nejvyšší úbytek, a to 6,25 %. V případě vzorků kola z materiálu ER7 nebyly vytvořeny průběhy jako pro vzorky kola z materiálu Class C, jelikož se jednalo o velmi podobné trendy.



Obr. 33 – Vypočtený úbytek Hertzova tlaku – materiál kola – Class C

5 Výpočet skutečného Hertzova tlaku

V případě, že se neuvažuje korekce kontaktního tlaku, případně se uvažuje korekce tlaku, praktikována v kapitole 4, jedná se v obou případech o chybné postupy. Důvodem je zjištění faktu, že se kontakt nerealizuje v celé šíři vzorku. Pro monitoring průběhu skutečného kontaktního tlaku byla na počátku zkoušky nastavena přitlačná síla odpovídající maximálnímu kontaktnímu tlaku o velikosti 1200 MPa, šířka stopy je závislá na konkrétním vzorku – viz příloha 6 a 10. Přitlačná síla zůstala po celou dobu testu konstantní, přičemž byla každých 25000 cyklů měřena reálná šířka kontaktní plochy, na základě které byl stanoven skutečný kontaktní tlak.

5.1 Naměřené profily kontaktní plochy vzorků

Do testu byla implementována jednoduchá metoda měření skutečné šířky kontaktní plochy, která spočívala v aplikaci kontrastní barvy na jízdní plochy vzorků. Tato barva byla v průběhu testu vytlačena z kontaktní plochy a na okraji utvořila silnější vrstvu, dle které bylo možné změřit aktuální šířku kontaktní plochy. Pomocí posuvného měřidla byla změřena šířka kontaktní plochy, zanesena do tabulky 6 a následně dle vzorce (2) spočtena aktuální hodnota kontaktního tlaku. Pro přesnější určení šířky stopy byly vzorky každých 25000 cyklů podrobeny rozměrovému měření na 3D souřadnicovém přístroji Wenzel LH65 CNC X3M. Tento stroj dokáže měřit s přesností na 1 μm .

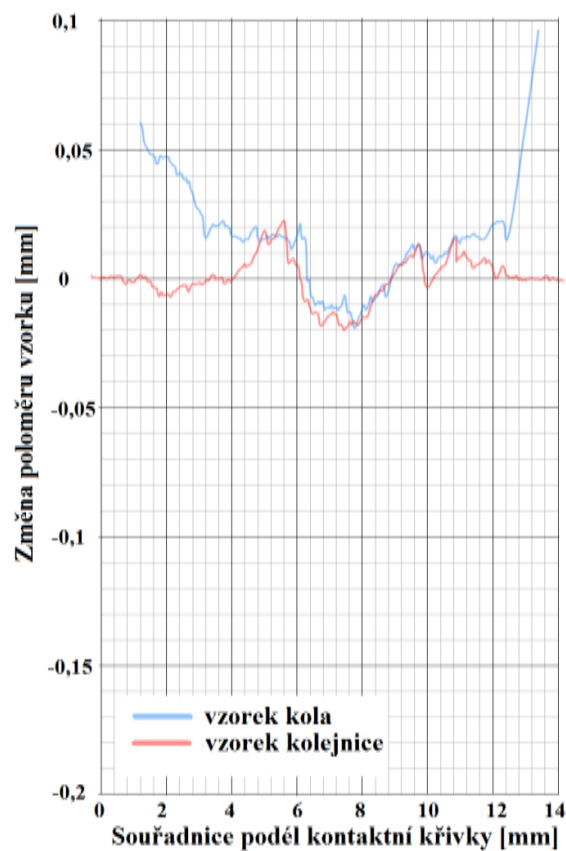
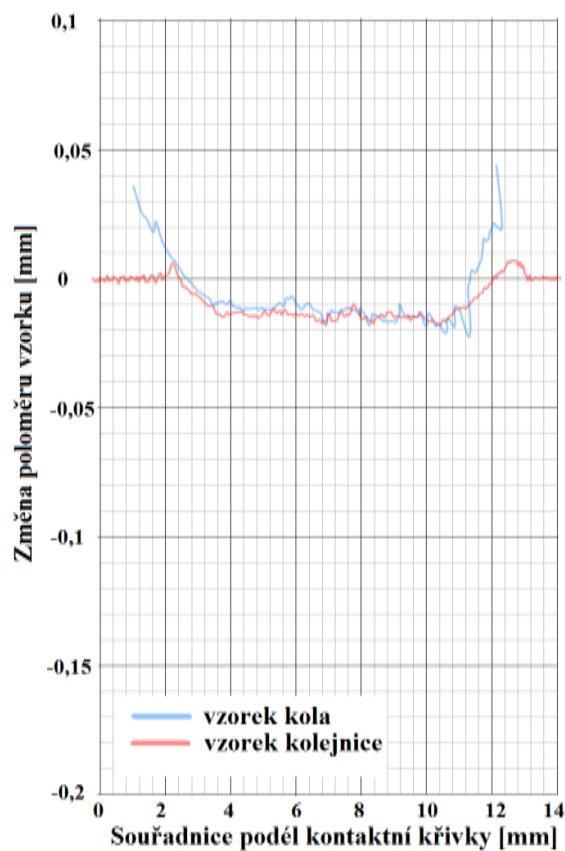
Na vzorcích byla změřena kontura kontaktního povrchu rubínovou kuličkou o průměru 1,5mm. Použití kuličky o menším průměru nebylo možné z důvodu nešroubového spojení kuličky a dřívku. Kuličky o menším průměru jsou totiž přilepeny k dřívku a lepidlo u takto malých ploch nemusí být schopné přenést vibrace způsobené zvrásněným a porušeným povrchem. Měření probíhala na plně očištěných vzorcích od ocelového prachu a kontrastní barvy za pokojové teploty 20°C.

Na Obr. 34. lze zhodnotit naměřené profily vzorku kola a kolejnice. V levém sloupci označeném jako Class C jsou naměřené vzorky po 25 000, 50 000, 75 000 a 100 000 cyklech. Totéž platí pro stranu pravou pro vzorky z materiálu kola ER7.

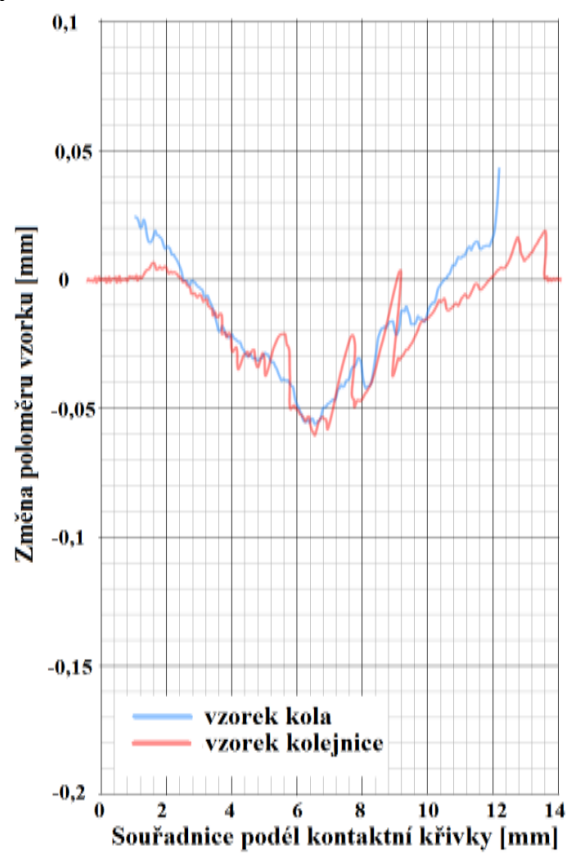
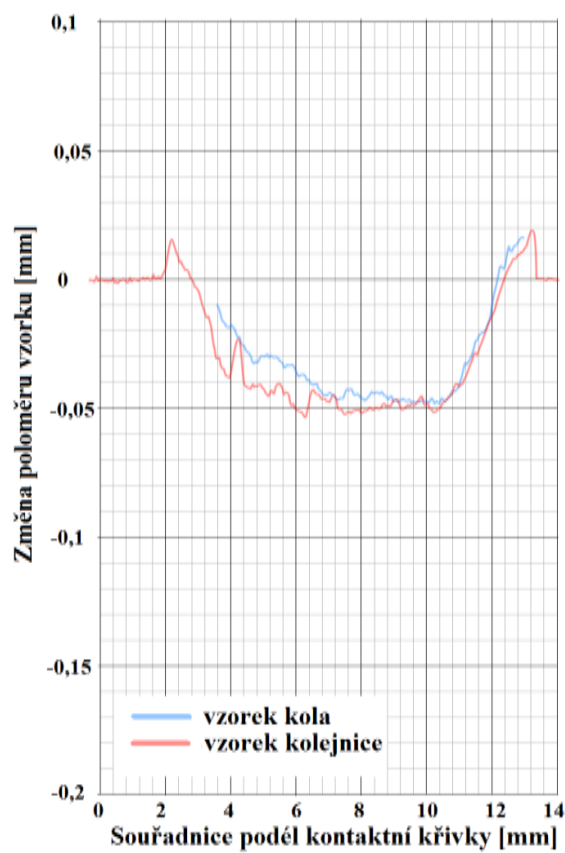
Class C

ER7

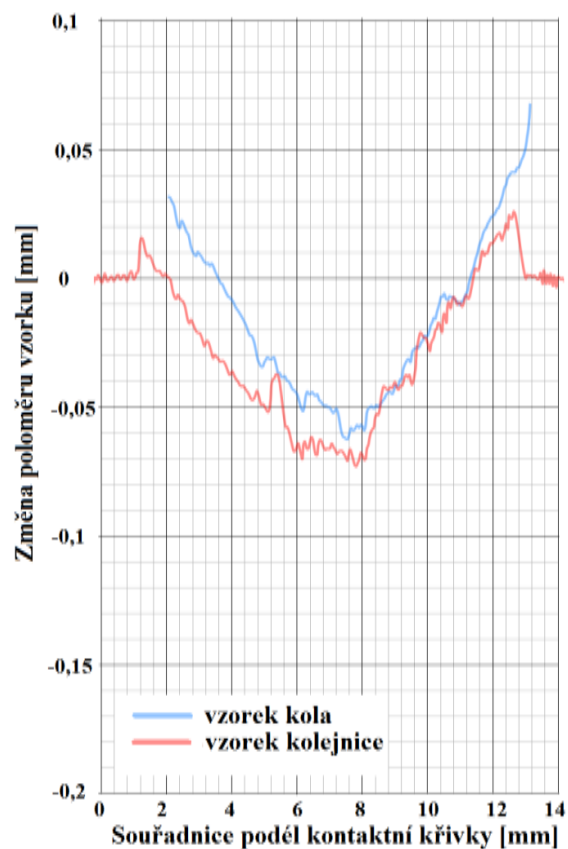
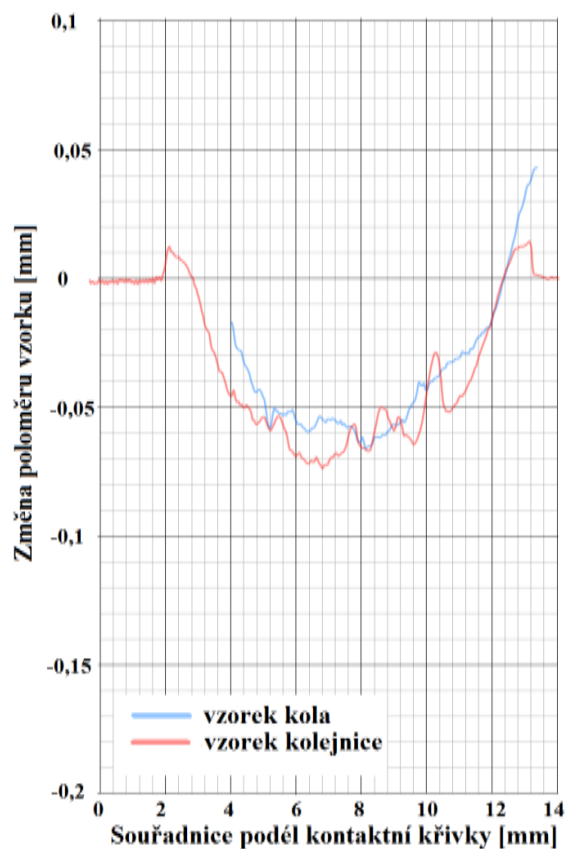
25 000 cyklů



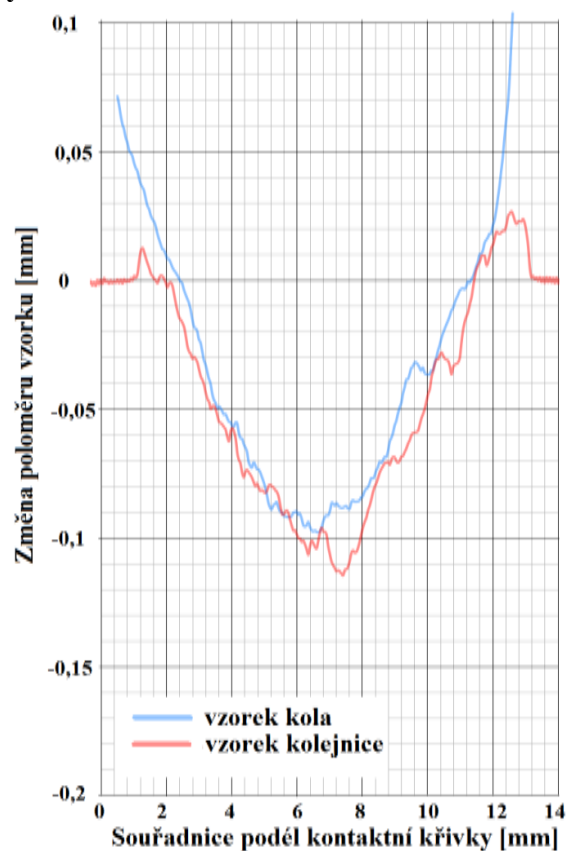
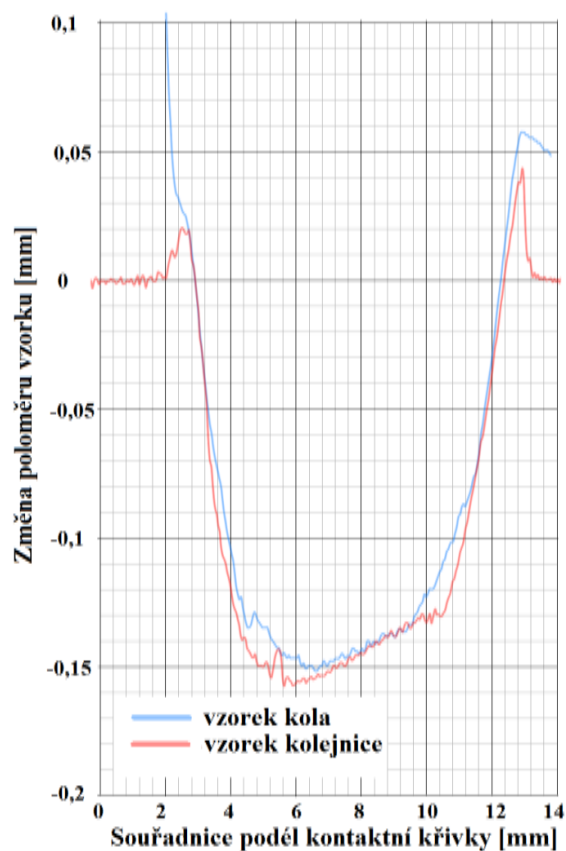
50 000 cyklů



75 000 cyklů



100 000 cyklů



Obr. 34 – Příčné profily pro materiály Class C a ER7 po 25000, 50000, 75000 a 100000 cyklech získané použitím 3D souřadnicového stroje

Z Obr. 34 je patrné, že kombinací materiálu Class C/Class C dochází k většímu opotřebení kolejnice z důvodu podobné tvrdosti obou vzorků, zatímco u kombinace ER7/Class C dochází spíše k většímu opotřebení vzorku simulujícího kolo. V případě kombinace vzorků kola a kolejnice Class C/Class C je patrnější lepší vzájemný kontakt než je tomu v případě kombinace ER7/Class C.

5.2 Skutečný Hertzův tlak

Jak už bylo zmíněno dříve, kontaktní tlak není po celou dobu testu konstantní. Délka kontaktní plochy tedy byla měřena dvěma metodami. První metoda spočívala v aplikaci kontrastní barvy, označeno v grafu na Obr. 35 a tabulkách 5, 6 jako CP, která byla vstříknuta před dokončení daného počtu cyklů na vzorek kola. Výsledky jsou zaznamenány v Tab. 5. Nutno podotknout, že šířka kontaktu musela být měřena na vzorku simulujícím kolo, kvůli házení obou vzorků. Z kontur naměřených pomocí souřadnicového stroje byly kontury spojeny, jak bylo uvedeno na Obr. 34 a byla odečtena přibližná délka, po kterou jsou obě křivky v kontaktu. Daný údaj byl rovněž zanesen do Tab. 5 (označení CMM). Z důvodu házení by měl být přesnější výpočet tlaku z křivek změřených 3D souřadnicovým strojem, jelikož hranice od kontrastní barvy mohla být posunuta.

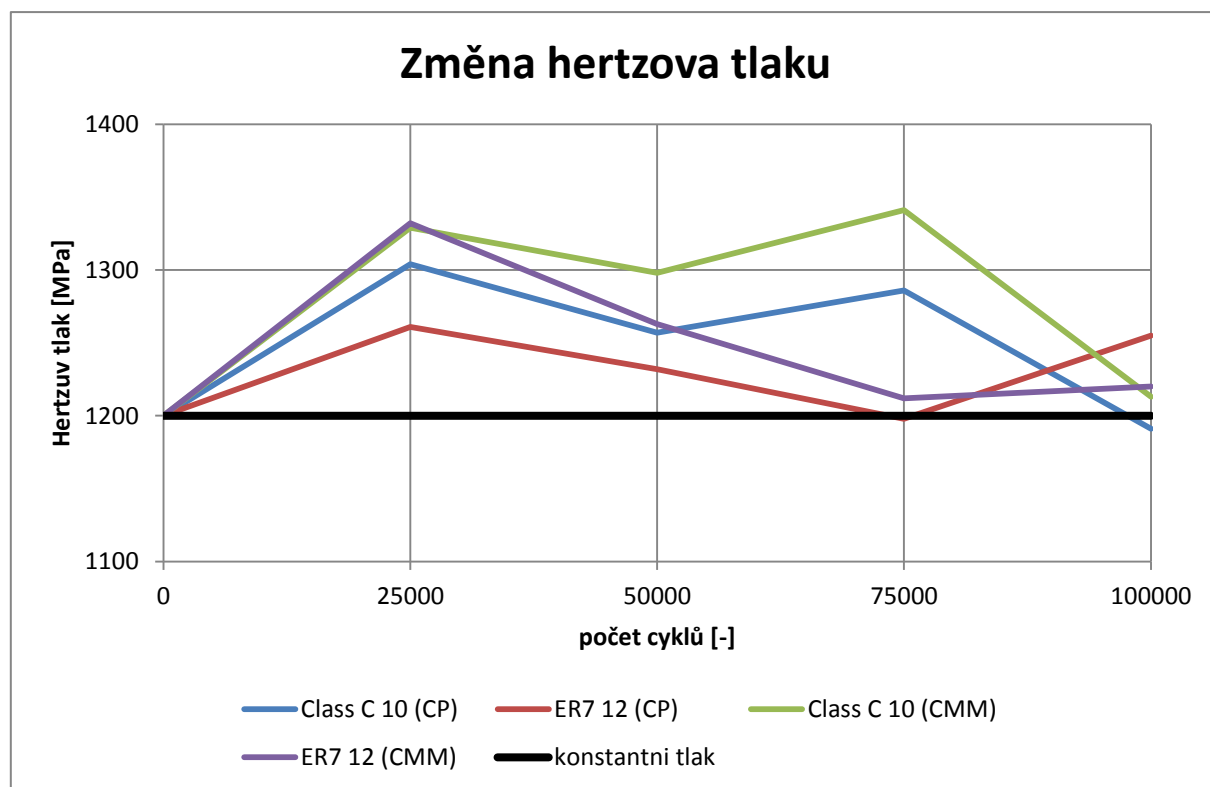
Počet cyklů	Class C		ER7	
	CP	CMM	CP	CMM
0	9,97 mm		10,00 mm	
25.000	8,45 mm	8,13 mm	9,06 mm	8,12 mm
50.000	9,12 mm	8,52 mm	9,49 mm	9,03 mm
75.000	8,74 mm	7,99 mm	10,03 mm	9,80 mm
100.000	10,1 mm	9,76 mm	9,15 mm	9,67 mm

Tab. 5 – Tabulka naměřených šířek kontaktní plochy

Z naměřených šířek z Tab. 5 a pomocí vzorce (2), byly spočteny maximální kontaktní tlaky, viz Tab. 6. Tyto hodnoty byly také zaneseny do grafu pro jejich lepší přehlednost, viz Obr. 35. V případě vzorků kola z materiálu Class C byl kontaktní tlak po 25000 cyklech o 100 MPa vyšší než počáteční. U materiálu ER7 došlo k překročení hodnoty 1300MPa pouze v případě šířky kontaktní plochy, jež byly získány s pomocí 3D souřadnicového stroje. Podobnost výsledku obou metod dokazuje, že výsledky mají jistou vypovídající hodnotu a nelze je ignorovat.

Počet cyklů	Class C		ER7	
	CP	CMM	CP	CMM
0	1200 MPa	1200 MPa	1200 MPa	1200 MPa
25.000	1304 MPa	1329 MPa	1267 MPa	1332 MPa
50.000	1257 MPa	1298 MPa	1239 MPa	1263 MPa
75.000	1286 MPa	1341 MPa	1198 MPa	1212 MPa
100.000	1191 MPa	1213 MPa	1255 MPa	1220 MPa

Tab. 6 – Tabulka skutečné hodnoty Hertzova tlaku

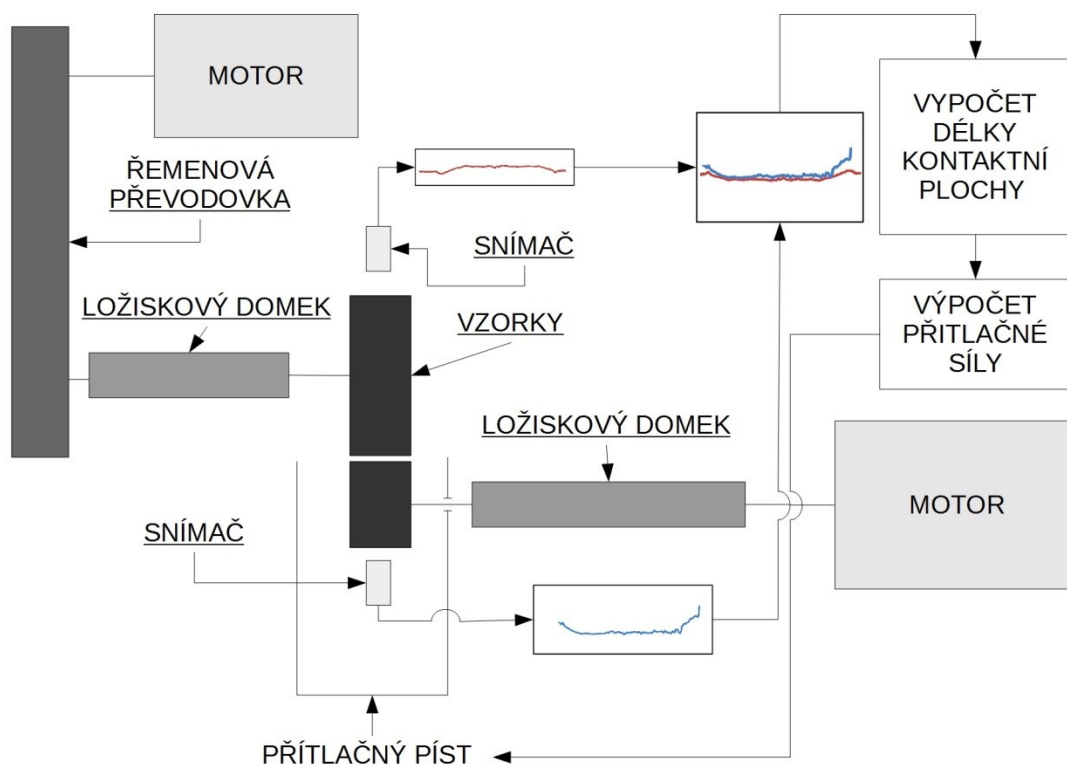


Obr. 35 – Skutečná změna Hertzova tlaku

Z vypočtených výsledků lze pozorovat největší rozdíl mezi materiály při 75 000 cyklech. Tyto materiály nelze jednoduše srovnávat, a to z důvodu značných rozdílů mezi kontaktními tlaky pro vybrané počty realizovaných cyklů.

6 Návrh metodiky měření

Návrh metodiky se v zásadě nijak neliší od testů prováděných jinými autory. Hlavní požadavek se týkal kompatibility s normou AAR M-101, která dovoluje změnu podmínek prozkoušení. Tato změna však musí opodstatněná. Jelikož bylo zjištěno chybné testování z důvodu nedodržení kontaktního tlaku po celou dobu testu, bylo navrženo dodatečné opatření ve formě kontinuálního měření šířky kontaktní stopy, která by umožňovala odpovídající měrou regulovat maximální kontaktní tlak na konstantní hodnotu - viz Obr. 36. Velikost přitlaku a prokluz lze v budoucnu optimalizovat tak, aby testy byly kratší, ale měly stejnou vypovídající hodnotu.



Obr. 36 – Schéma stroje po úpravě

Z Obr. 36 je patrné, že navíc přibyly dva snímače, jejichž úkolem je snímat konturu povrchu, ze které se následně stanoví šířka kontaktní plochy a případně i radiální vzdálenost od osy rotace pro úplnou přesnost výpočtu tlaku. Uvedené hodnoty poslouží pro regulaci přitlačné síly s cílem regulovat kontaktní tlak na konstantní hodnotu.

7 Závěr

Diplomová práce se zabývá návrhem metodiky zkoušek odolnosti proti opotřebení pro vybrané materiály železničních kol. Návrh byl koncipován pro použití na stroji twin-disk test ve firmě Bonatrans Group a.s. se sídlem v Bohumíně, jehož výrobcem je INOVA. Twin-disk test se v různých modifikacích používá několik desítek let. Za předpokladu potřeby plynulého řízení prokluzu je nejlepší použití dvou nezávislých motorů tak, jak to je i v případě užívaného stroje.

Počáteční kontaktní tlak byl určen pomocí Hertzovy teorie pro liniový styk dvou válcových ploch. Skluz a velikost počátečního Hertzova tlaku byly zvoleny s hodnotami 2% a 1200MPa. V první fázi proběhly testy s cílem korigovat kontaktní tlak na základě změny šířky vzorku (korekce vždy po 25000 cyklech s celkovou délkou testu 100000 cyklů). Na základě tohoto přístupu by měl kontaktní tlak progresivně klesat. V další fázi probíhalo měření šířky kontaktní plochy prostřednictvím dvou metod, a to vždy po 25000 cyklech. První metodou bylo měření šířky kontaktní plochy s využitím kontrastní barvy, která byla aplikována přímo na jízdní plochu vzorku kola za plného provozu. Druhá metoda spočívala v aplikaci 3D souřadnicového stroje Wenzel LH65 CNC X3M, který stanovil tvar profilů pro vzorek kola a kolejnice. Na základě částečné podobnosti obou křivek bylo možné určit přibližnou šířku kontaktní plochy. Obě použité metody disponovaly velmi podobnými výsledky, což svědčí o použitelnosti metody využívající kontrastní barvu při praktických měřeních.

V závěru práce byla navržena dodatečná modifikace zkušebního stroje, tak aby bylo možné korekci kontaktního tlaku realizovat v reálném čase, pro účely dodržování normy AAR M-101. Po úpravě, by stroj splňoval podmínky, jaké si žádá již zmíněná norma, a jednotlivé materiály by tedy byly vzájemně porovnatelné. Původní metodika se nijak neliší od požadavků stanovených normou, avšak je doplněna o inovativní korekci tlaku. Není možné srovnávat materiály při různých hodnotách kontaktního tlaku, avšak se stejnou přitlačnou silou. Na základě této práce by mohlo dojít ke zlepšení predikce chování materiálů pro železniční dvojkolí a následnému vývoji používaných materiálů na železnici.

Na závěr bych chtěl poděkovat vedoucímu své diplomové práce Ing. Michalu Šoferovi, Ph.D. za věnovaný čas a užitečné rady. Členům VaV Bonatrans a Ing. Lence Čepové, Ph.D. za pomoc při měření. Své rodině a přítelkyni za psychickou podporu.

8 Seznam použité literatury

- [1] BACIGALUPO, Nelson et al. *Stationary element rolling contact fatigue tester*. US 5837882 A.
- [2] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery* [online]. Svitavy: SOU Svitavy, 2014 [cit. 2017-05-10]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/Cover.html>
- [3] BUCHER F., DIMITRIEV A.I., ERTZ M., KNOTHE K., POPOV V.L., PSAKHIE S.G., SHILKO E.V. *Multiscale simulation of dry friction in wheel/rail contact*. Wear, 2006, Vol. 261, p. 874–884.
- [4] FITCH, J., *Aren't Machines Supposed To Wear Out?*, Machinery Lubrication Magazine [online]. Zaří 2002 [cit. 2017-02-10]. Dostupný z WWW: http://www.machinerylubrication.com/article_detail.asp?articleid=389&relatedbookgroup=Wear%20Debris
- [5] JOHNSON, K. L. *Contact mechanics*. New York: Cambridge University Press, 1985. ISBN 0-521-25576-7.
- [6] JUNG-WON S., HYUN-KYU J., SEOK-JIN K., DONG-HYEONG L. *Analysis of contact fatigue crack growth using twin-disc tests and numerical evaluations*. Fatigue, 2013, Vol. 55, p. 54–63.
- [7] JUNG-WON S., HYUN-KYU J., SEOK-JIN K., DONG-HYEONG L. *Rolling contact fatigue and wear of two different rail steels under rolling-sliding contact*. Fatigue, 2016, Vol. 83, p. 184–194.
- [8] KIKUCHI N., ODEN J. T. *Contact Problems in Elasticity: A Study of Variational Inequalities and Finite Element Methods*. SIAM, 1998, 495p. ISBN 978-0-898-71202-5
- [9] LEPIKOVÁ, Veronika. *Vliv povrchových úprav desky kola železničního dvojkolí na únavové vlastnosti*. Ostrava, 2016. Diplomová práce. VŠB-TUO, Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství, Katedra materiálového inženýrství.
- [10] LEWIS S.R., LEWIS R., EVANS G., BUCKLEY-JOHNSTONE L.E. *Assessment of railway curve lubricant performance using a twin-disc tester*. Wear, 2014, Vol. 314, p. 205–212.
- [11] MAYA-JOHNSON S., SANTA J.F., TORO A. *Dry and lubricated wear of rail steel under rolling contact fatigue – wear mechanism and crack growth*. Wear, 2017, Vol. 380-381, p. 240–250.
- [12] POPELKA, J. *Vliv cílené modifikace topografie na únavové poškození třecích povrchů*. Brno, 2008. Diplomová práce. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství.

- [13] POPOV V. *Contact Mechanics and Friction*. Springer, 2010, 362p. ISBN 978-3-642-10802-0
- [14] POŽÁR, R. *Rozvoj materiálového poškození při záběru ozubených kol a jeho vizualizace*. Brno, 2009. Diplomová práce. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, Agronomická fakulta, Ústav techniky a automobilové dopravy
- [15] PUCZOK, Petr. *Vypracování metodiky pro stanovení míry opotřebení nákladních vozů*. Ostrava, 2013. Diplomová práce. VŠB-TUO, Fakulta strojní, Institut dopravy.
- [16] RAMALHO A., ESTEVES M., MARTA P. *Friction and wear behavior of rolling-sliding steel contacts*. Wear, 2013, Vol. 302, p. 1468–1480.
- [17] ŠOFER, Michal. *Koncepční návrh úprav zkušebního stroje pro výzkum kontaktní únavy*. Ostrava, 2009. Diplomová práce. VŠB-TUO, Fakulta strojní, Katedra pružnosti a pevnosti.
- [18] ŠOFER, Michal. *Popis degradace povrchu konstrukčních prvků vlivem opakovaného kontaktního zatížení*. Ostrava, 2012. Disertační práce. VŠB-TUO, Fakulta strojní, Katedra pružnosti a pevnosti.
- [19] TYFOUR W.R., BEYNON, J.H., KAPOOR, A. *The steady state wear behavior of pearlitic rail steel under dry rolling–sliding contact condition*. Wear, 1995, Vol. 180, p. 79–89.
- [20] TYFOUR W.R., BEYNON, J.H., KAPOOR, A. *Deterioration of rolling contact fatigue life of pearlitic rail steel due to dry-wet rolling/sliding line contact*. Wear, 1996, Vol. 197, p. 255-265.
- [21] WROGGERS P., NACKENHORST U. *Analysis and Simulation of Contact Problems*. Springer, 2006, 390p. ISBN 978-3-540-31760-9

9 Seznam přílohy

Příloha 1 – tabulka naměřených tvrdostí kola	1
Příloha 2 – tabulka naměřených tvrdostí vzorku z materiálu ER7	2
Příloha 3 – tabulka naměřených tvrdostí vzorku z materiálu Class C	3
Příloha 4 – naměřené hodnoty materiálu ER7 pro vzorek č. 5 a č. 6	4
Příloha 5 – naměřené hodnoty materiálu ER7 pro vzorek č. 7 a č. 8	5
Příloha 6 – naměřené hodnoty materiálu ER7 pro vzorek č. 10 a č. 12	6
Příloha 7 – naměřené hodnoty materiálu Class C pro vzorek č. 2 a č. 3	7
Příloha 8 – naměřené hodnoty materiálu Class C pro vzorek č. 5 a č. 6	8
Příloha 9 – naměřené hodnoty materiálu Class C pro vzorek č. 7 a č. 9	9
Příloha 10 – naměřené hodnoty materiálu Class C pro vzorek č. 10	10
Příloha 11 – naměřené hodnoty materiálu kol	11
Příloha 12 – úbytek poloměru (1200MPa; 0,6%)	13
Příloha 13 – úbytek poloměru (1200MPa; 1,0%)	14
Příloha 14 – úbytek hmotnosti (1200MPa; 0,6%)	15
Příloha 15 – úbytek hmotnosti (1200MPa; 1,0%)	16
Příloha 16 – úbytek tloušťky (1200MPa; 0,6%)	17
Příloha 17 – úbytek tloušťky (1200MPa; 1,0%)	18

Příloha 1 – tabulka naměřených tvrdostí kola

KOLO	MĚŘENÍ					PRŮMĚR
	1	2	3	4	5	
1	313,4	285,8	315,8			305,0
2	331,2	300,0	297,4			309,5
3	366,8	272,7	375,9			371,8
4	365,1	391,1	418,8			391,7
5	417,5	384,8	414,7			405,7
6						384,0
7	384,4	405,1	378,6			389,4
8	425,2	381,8	372,4	375,5		388,7
9	428,4	406,2	377,2	363,5	459,8	407,0
10	354,1	374,8	382,6			370,5
11	424,7	402,9	392,5			406,7
12	399,1	423,3	422,9			415,1
13	375,2	382,2	406,6			388,0

Příloha 2 – tabulka naměřených tvrdostí vzorku z materiálu ER7

ER7		MĚŘENÍ				PRŮMĚR	
KOLO		1	2	3	4		
1	A	264,1	266,8	255,2		262,0	272,5
	B	283,9	279,8	285,3		283,0	
2	A	272,5	262,7	270,9		268,7	277,7
	B	292,1	288,3	279,4		286,6	
3	A	270,5	258,7	258,7		262,6	269,0
	B	278,6	288,7	258,7		275,3	
4	A	275	262,8	259,7		265,8	280,6
	B	290,9	298,3	296,9		295,4	
5	A	275,4	267,1	272,9		271,8	278,5
	B	282,9	281,1	291,3		285,1	
6	A	249,6	286	269,4	273	269,5	279,7
	B	285,3	285,6	308,8		293,2	
7	A	276,9	279,5	270,7		275,7	281,4
	B	301,1	269,3	286,4	286,2	285,8	
8	A	271,6	271,3	263,6		268,8	280,2
	B	295,1	275,5	304,2		291,6	
9	A	299,9	283,9	291,7		291,8	290,4
	B	278,1	292,6	296		288,9	
10	A	294	288,7	289,3		290,7	328,7
	B	367,9	358,7	363	339,3	357,2	
11	A	305,7	299,3	297,1		300,7	293,1
	B	284	290,2	282		285,4	
12	A	270	289,9	287	294	285,2	285,9
	B	295,4	276,8	287,9		286,7	
13	A	306,5	276,2	268,7	272	280,9	298,8
	B	316,1	305,3	326,1	319,5	316,8	
14	A	303,8	312,7	301,5	301	304,8	302,4
	B	295,1	298,7	304		299,3	
15	A	301,7	298,1	304,1		301,3	302,6
	B	317	290,1	304,7		303,9	

Příloha 3 – tabulka naměřených tvrdostí vzorku z materiálu Class C

Class C		MĚŘENÍ				PRŮMĚR	
KOLO		1	2	3	4		
1	A	370,7	420,9	400,9	398,8	397,8	371,1
	B	330,2	327,1	348,8		335,4	
2	A	314,6	328,4	327,7		323,6	332,0
	B	336,1	345,6	339,6		340,4	
3	A	339	356,8	334,6		343,5	354,0
	B	368,6	371,7	353,2		364,5	
4	A	313,1	315,9	310,4		313,1	337,2
	B	359	367,4	357,3		361,2	
5	A	388	372,2	382,4		380,9	359,0
	B	358,7	327,6	342,6	341,6	342,6	
6	A	371,2	368,6	368,3	371,4	369,9	365,7
	B	380,3	339,9	357,6	368	361,5	
7	A	341,4	371,2	343,4	360,5	354,1	349,1
	B	364,4	339	333	340	344,1	
8	A	336,3	339,2	343,4		339,6	350,3
	B	362,6	360,7	343,7	366,4	358,4	
9	A	324	342,5	321,6		329,4	345,7
	B	367,7	351,8	366,5		362,0	
10	A	374,8	337,7	350,7		354,4	361,8
	B	369,5	363,6	374,2		369,1	
11	A	354,8	362,1	364,5		360,5	353,1
	B	347	346,2	344,1		345,8	
12	A	344,3	351,8	387,5	341,8	356,4	350,5
	B	340,3	340,9	346,7		342,6	
13	A	310,8	346,8	360,8	342	340,1	348,2
	B	383,6	341	344	356,8	356,4	
14	A	363,1	382,8	352,8	338,2	359,2	355,2
	B	349,3	352,4	347,7		349,8	
15	A	339,3	365,8	300,9	335,3	335,3	345,7
	B	359,4	359,7	359,6		359,6	

Příloha 4 – naměřené hodnoty materiálu ER7 pro vzorek č. 5 a č. 6

ER7 č. 5														
p. cyklů	Průměr [mm]				Tloušťka [mm]				Drsnost (Ra)				Hmotnost [g]	Úbytek hmotnosti [g]
	1	2	3	Stř. hodn.	1	2	3	Stř. hodn.	1	2	3	Stř. hodn.		
0	70,09	70,09	70,10	70,09	10,08	10,16	10,13	10,13	1,11	1,12	1,11	1,11	363,99	0,00
25 000	69,77	69,92	69,95	69,89	10,70	10,65	10,61	10,64	1,86	1,14	1,60	1,58	363,29	0,70
50 000	69,66	69,64	69,67	69,65	11,48	11,47	11,32	11,36	1,26	1,04	1,24	1,25	361,95	2,04
75 000	69,40	69,40	69,37	69,39	11,95	11,73	11,68	11,81	0,85	1,22	1,27	1,11	360,70	3,29
100 00	69,24	69,3	69,21	69,24	12,31	12,15	12,18	12,24	1,38	0,87	1,13	1,19	359,84	4,15

ER7 č. 6														
p. cyklů	Průměr [mm]				Tloušťka [mm]				Drsnost (Ra)				Hmotnost [g]	Úbytek hmotnosti [g]
	1	2	3	Stř. hodn.	1	2	3	Stř. hodn.	1	2	3	Stř. hodn.		
0	70,09	70,10	70,09	70,10	10,01	10,08	10,02	10,04	1,01	0,99	0,99	1,00	363,58	0,00
25 000	69,77	69,77	69,83	69,78	10,95	10,76	10,73	10,86	0,92	0,85	0,86	0,81	362,70	0,88
50 000	69,53	69,46	69,51	69,53	11,50	11,73	11,67	11,60	1,15	1,24	1,63	1,35	361,29	2,29
75 000	69,26	69,32	69,28	69,29	12,08	12,21	12,03	12,08	1,66	1,17	1,08	1,42	360,12	3,46
100 00	68,97	68,99	69,06	69,00	12,32	12,39	12,64	12,42	0,71	0,93	1,34	1,01	358,76	4,82

Příloha 5 – naměřené hodnoty materiálu ER7 pro vzorek č. 7 a č. 8

ER7 č. 7														
p. cyklů	Průměr [mm]				Tloušťka [mm]				Drsnost (Ra)				Hmotnost [g]	Úbytek hmotnosti [g]
	1	2	3	Stř. hodn.	1	2	3	Stř. hodn.	1	2	3	Stř. hodn.		
0	70,11	70,13	70,11	70,11	10,08	10,07	10,12	10,09	1,09	1,14	1,14	1,12	363,85	0,00
25 000	69,55	69,61	69,54	69,57	11,79	11,61	11,73	11,72	1,64	1,64	1,28	1,51	361,33	2,52
50 000	68,93	69,06	69,06	69,04	12,61	12,17	12,75	12,48	1,76	2,25	1,44	1,88	358,34	5,51
75 000	68,50	68,54	68,42	68,51	12,99	13,39	13,33	13,29	1,79	1,64	1,21	1,73	355,32	8,53
100 00	67,89	67,52	67,83	67,85	13,45	13,58	13,70	13,60	1,73	2,03	1,33	1,67	351,94	11,91

ER7 č. 8														
p. cyklů	Průměr [mm]				Tloušťka [mm]				Drsnost (Ra)				Hmotnost [g]	Úbytek hmotnosti [g]
	1	2	3	Stř. hodn.	1	2	3	Stř. hodn.	1	2	3	Stř. hodn.		
0	70,06	70,07	70,07	70,07	10,00	9,98	9,97	70,06	0,96	0,97	1,00	0,98	363,95	0,00
25 000	69,38	69,43	69,42	69,42	11,96	12,02	11,98	69,38	1,53	1,90	1,25	1,49	361,80	2,15
50 000	68,86	68,99	68,61	68,81	12,94	12,73	12,90	68,86	2,07	1,59	1,12	1,53	358,52	5,43
75 000	68,35	68,41	68,43	68,30	13,35	13,66	13,57	68,35	1,09	1,96	1,60	1,61	355,34	8,61
100 00	67,78	67,73	67,91	67,82	14,03	13,78	14,16	67,78	2,02	1,58	1,37	1,58	352,20	11,75

Příloha 6 – naměřené hodnoty materiálu ER7 pro vzorek č. 10 a č.12

ER7 č. 10														
p. cyklů	Průměr [mm]				Tloušťka [mm]				Drsnost (Ra)				Hmotnost [g]	Úbytek hmotnosti [g]
	1	2	3	Stř. hodn.	1	2	3	Stř. hodn.	1	2	3	Stř. hodn.		
0	69,95	69,91	69,90	69,93	9,94	9,94	9,98	9,95	0,87	0,86	0,88	0,87	362,67	0,00
25 000	69,80	69,80	69,81	69,80	10,52	10,42	10,32	10,42	1,43	1,47	1,45	1,45	362,10	0,57
50 000	69,63	69,59	69,61	69,62	10,93	10,83	10,87	10,88	1,55	1,24	1,02	1,23	361,17	1,50
75 000	69,48	69,43	69,41	69,43	11,55	11,44	11,42	11,46	0,81	0,89	1,31	1,04	360,18	2,49
100 00	69,26	69,25	69,24	69,25	11,85	11,74	11,74	11,79	1,09	1,18	1,30	1,20	359,22	3,45

ER7 č. 12														
p. cyklů	Průměr [mm]				Tloušťka [mm]				Drsnost (Ra)				Hmotnost [g]	Úbytek hmotnosti [g]
	1	2	3	Stř. hodn.	1	2	3	Stř. hodn.	1	2	3	Stř. hodn.		
0	70,01	70,02	70,03	70,02	10,00	10,00	10,00	10,00	0,920	0,940	1,010	0,96	364,24	0
25 000	69,16	69,11	69,11	69,13	11,91	11,86	11,78	12,85	1,370	1,310	1,710	1,42	361,79	2,45
50 000	69,00	68,99	69,04	69,01	13,21	13,01	13,05	13,17	1,100	1,450	1,070	1,23	360,88	3,36
75 000	68,90	68,89	68,88	68,89	13,29	13,29	13,36	13,33	1,270	1,330	0,870	1,20	360,39	3,85
100 00	68,81	68,86	68,80	68,83	13,48	13,54	13,59	13,55	1,260	1,440	0,920	1,14	360,18	4,06

Příloha 7 – naměřené hodnoty materiálu Class C pro vzorek č. 2 a č.3

Class C č. 2														
p. cyklů	Průměr [mm]				Tloušťka [mm]				Drsnost (Ra)				Hmotnost [g]	Úbytek hmotnosti [g]
	1	2	3	Stř. hodn.	1	2	3	Stř. hodn.	1	2	3	Stř. hodn.		
0	70,04	70,07	70,05	70,05	10,15	10,11	10,19	10,15	0,68	0,66	0,69	0,68	359,04	0,00
25 000	69,64	69,64	69,65	69,64	11,17	11,14	11,20	11,17	1,86	2,17	1,18	1,67	356,60	2,44
50 000	69,24	69,29	69,23	69,24	11,78	11,96	11,94	11,99	1,01	3,00	1,67	1,65	354,16	4,88
75 000	68,94	69,03	69,05	69,01	12,25	12,42	12,45	12,21	3,10	1,16	1,63	2,11	352,23	6,81
100 00	68,83	68,68	68,71	68,68	12,79	12,70	12,71	12,61	2,68	1,16	2,40	1,70	350,08	8,96

Class C č. 3														
p. cyklů	Průměr [mm]				Tloušťka [mm]				Drsnost (Ra)				Hmotnost [g]	Úbytek hmotnosti [g]
	1	2	3	Stř. hodn.	1	2	3	Stř. hodn.	1	2	3	Stř. hodn.		
0	70,06	70,09	70,05	70,07	10,25	10,17	10,14	70,06	0,60	0,65	0,56	0,60	359,47	0,00
25 000	69,67	69,68	69,67	69,67	11,35	11,43	11,34	69,67	1,44	1,98	1,46	1,57	357,07	2,40
50 000	69,17	69,25	69,23	69,22	12,09	12,07	12,03	69,17	1,36	1,31	1,24	1,30	354,36	5,11
75 000	68,92	68,87	68,81	68,91	12,43	12,51	12,52	68,92	1,19	1,35	1,71	1,42	352,10	7,37
100 00	68,60	68,61	68,58	68,60	12,70	12,90	12,87	68,60	1,34	1,04	0,81	1,20	350,08	9,39

Příloha 8 – naměřené hodnoty materiálu Class C pro vzorek č. 5 a č. 6

Class C č. 5														
p. cyklů	Průměr [mm]				Tloušťka [mm]				Drsnost (Ra)				Hmotnost [g]	Úbytek hmotnosti [g]
	1	2	3	Stř. hodn.	1	2	3	Stř. hodn.	1	2	3	Stř. hodn.		
0	69,93	69,94	69,95	69,94	9,95	9,93	9,94	9,94	0,71	0,70	0,69	0,70	359,62	0,00
25 000	69,88	69,86	69,90	69,89	10,22	10,17	10,17	10,18	1,09	1,12	0,88	1,09	359,44	0,18
50 000	69,82	69,93	69,85	69,86	10,47	10,46	10,46	10,46	0,85	1,24	1,60	1,19	358,90	0,72
75 000	69,72	69,69	69,84	69,76	10,69	10,68	10,67	10,69	0,87	0,73	0,79	0,80	358,39	1,23
100 00	69,59	69,66	69,79	69,66	11,04	11,01	10,98	11,02	1,03	1,75	1,41	1,21	357,72	1,90

Class C č. 6														
p. cyklů	Průměr [mm]				Tloušťka [mm]				Drsnost (Ra)				Hmotnost [g]	Úbytek hmotnosti [g]
	1	2	3	Stř. hodn.	1	2	3	Stř. hodn.	1	2	3	Stř. hodn.		
0	69,95	69,97	69,98	69,97	10,00	10,01	10,01	10,01	0,65	0,66	0,64	0,65	363,68	0,00
25 000	69,69	69,70	69,67	69,69	11,01	11,17	11,05	11,09	1,70	1,35	2,02	1,69	361,96	1,72
50 000	69,08	69,33	69,34	69,28	12,09	12,00	11,75	11,86	1,25	1,20	1,36	1,40	359,60	4,08
75 000	68,99	69,01	69,02	68,99	12,19	12,16	12,35	12,35	1,60	1,73	1,54	1,55	357,35	6,33
100 00	68,42	68,74	68,70	68,62	12,39	12,87	12,33	12,61	1,34	1,23	1,93	1,41	354,86	8,82

Příloha 9 – naměřené hodnoty materiálu Class C pro vzorek č. 7 a č. 9

Class C č. 7														
p. cyklů	Průměr [mm]				Tloušťka [mm]				Drsnost (Ra)				Hmotnost [g]	Úbytek hmotnosti [g]
	1	2	3	Stř. hodn.	1	2	3	Stř. hodn.	1	2	3	Stř. hodn.		
0	70,02	70,03	70,01	70,02	10,04	10,01	10,02	10,02	0,56	0,55	0,55	0,55	359,07	0,00
25 000	69,99	70,00	69,97	69,99	10,34	10,34	10,34	10,34	0,97	0,90	0,82	0,90	358,79	0,28
50 000	69,88	69,85	69,86	69,86	10,75	10,79	10,73	10,74	1,11	1,07	1,53	1,24	357,92	1,15
75 000	69,74	69,71	69,75	69,72	11,23	11,14	11,23	11,23	1,11	1,05	1,28	1,24	357,02	2,05
100 00	69,54	69,52	69,59	69,55	11,62	11,69	11,64	11,63	1,32	1,44	1,38	1,38	356,04	3,03

Class C č. 9														
p. cyklů	Průměr [mm]				Tloušťka [mm]				Drsnost (Ra)				Hmotnost [g]	Úbytek hmotnosti [g]
	1	2	3	Stř. hodn.	1	2	3	Stř. hodn.	1	2	3	Stř. hodn.		
0	69,96	69,98	70,00	69,98	10,00	10,00	10,00	10,00	0,72	0,73	0,71	0,72	359,39	0,00
25 000	69,66	69,58	69,61	69,61	11,32	11,42	11,37	11,37	1,34	1,31	1,30	1,33	357,01	2,38
50 000	69,22	69,20	69,18	69,20	12,13	12,07	12,10	12,11	1,48	1,44	1,52	1,51	354,46	4,93
75 000	68,82	68,80	68,76	68,80	12,64	12,70	12,77	12,72	1,74	1,30	1,68	1,53	351,94	7,45
100 00	68,38	68,37	68,40	68,39	13,11	13,08	13,12	13,11	1,61	1,53	1,45	1,57	349,29	10,10

Příloha 10 – naměřené hodnoty materiálu Class C pro vzorek č. 10

Class C č. 10														
p. cyklů	Průměr [mm]				Tloušťka [mm]				Drsnost (Ra)				Hmotnost [g]	Úbytek hmotnosti [g]
	1	2	3	Stř. hodn.	1	2	3	Stř. hodn.	1	2	3	Stř. hodn.		
0	69,97	69,95	69,99	69,97	9,95	9,93	9,97	9,95	0,66	0,67	0,65	0,66	358,63	0,00
25 000	69,65	69,63	69,64	69,64	11,11	11,08	11,05	11,08	1,33	1,24	1,47	1,32	356,53	2,10
50 000	69,36	69,40	69,45	69,41	11,74	11,75	11,79	11,76	1,61	1,14	1,18	1,23	354,88	3,75
75 000	69,18	69,17	69,21	69,19	12,11	12,12	12,11	12,12	1,03	1,17	1,21	1,11	353,61	5,02
100 00	69,00	68,96	68,96	68,97	12,76	12,70	12,68	12,71	1,06	1,00	0,99	1,03	353,18	5,45

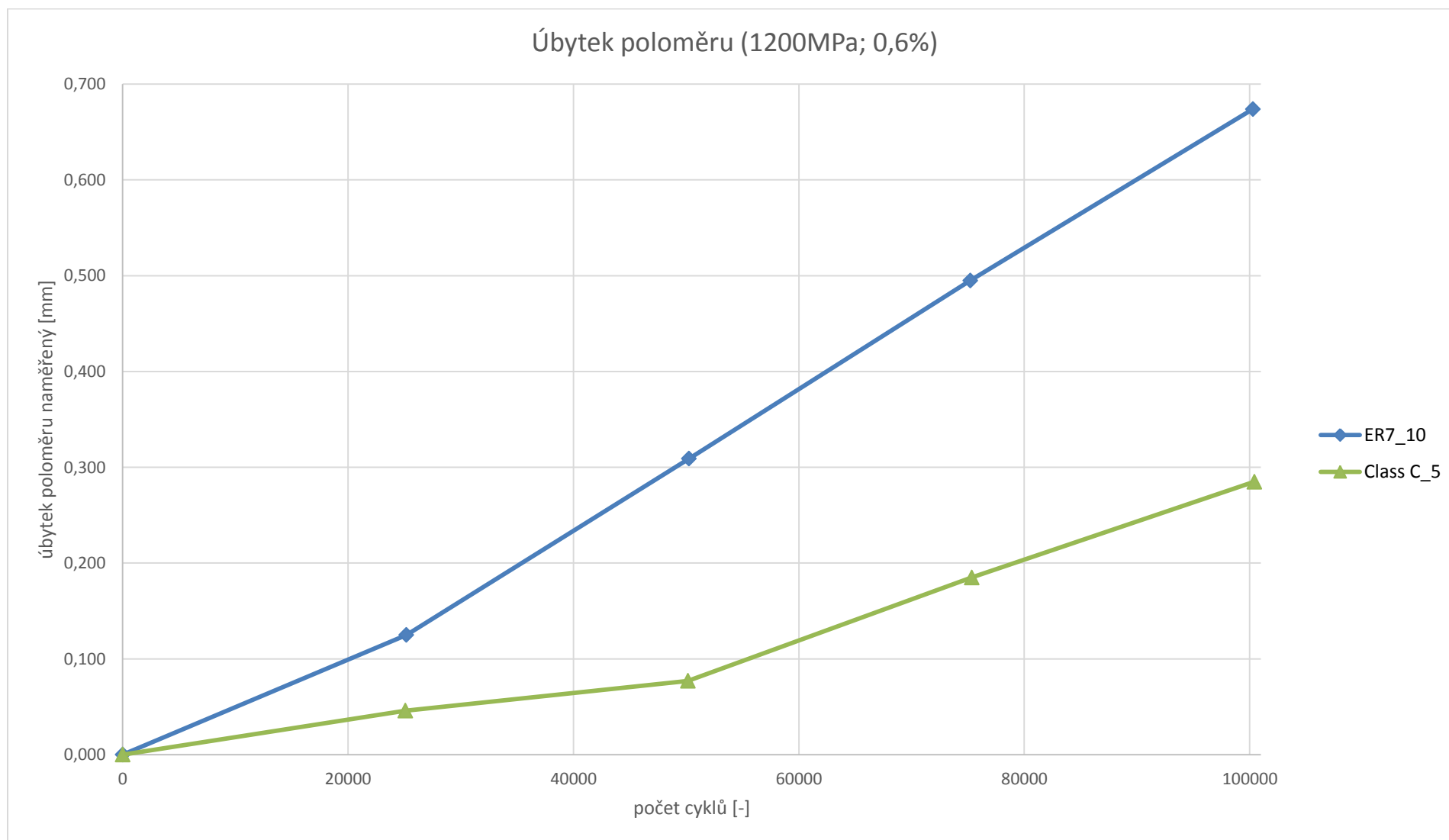
Příloha 11 – naměřené hodnoty materiálu kol

	kotouč 4		kotouč 5		kotouč 8		kotouč 1		kotouč 1 (zbrúšeno)	
Počet cyklů	Střední hodnota průměru [mm]	Úbytek hmotnosti [g]	Střední hodnota průměru [mm]	Úbytek hmotnosti [g]	Střední hodnota průměru [mm]	Úbytek hmotnosti [g]	Střední hodnota průměru [mm]	Úbytek hmotnosti [g]	Střední hodnota průměru [mm]	Úbytek hmotnosti [g]
0	219,75	5796,50	219,82	5786,05	218,02	5591,22	217,86	5615,31	216,700	5414,140
100 000	219,66	5795,03	219,73	5784,16	217,68	5587,83	217,70	5610,57	216,548	5412,740

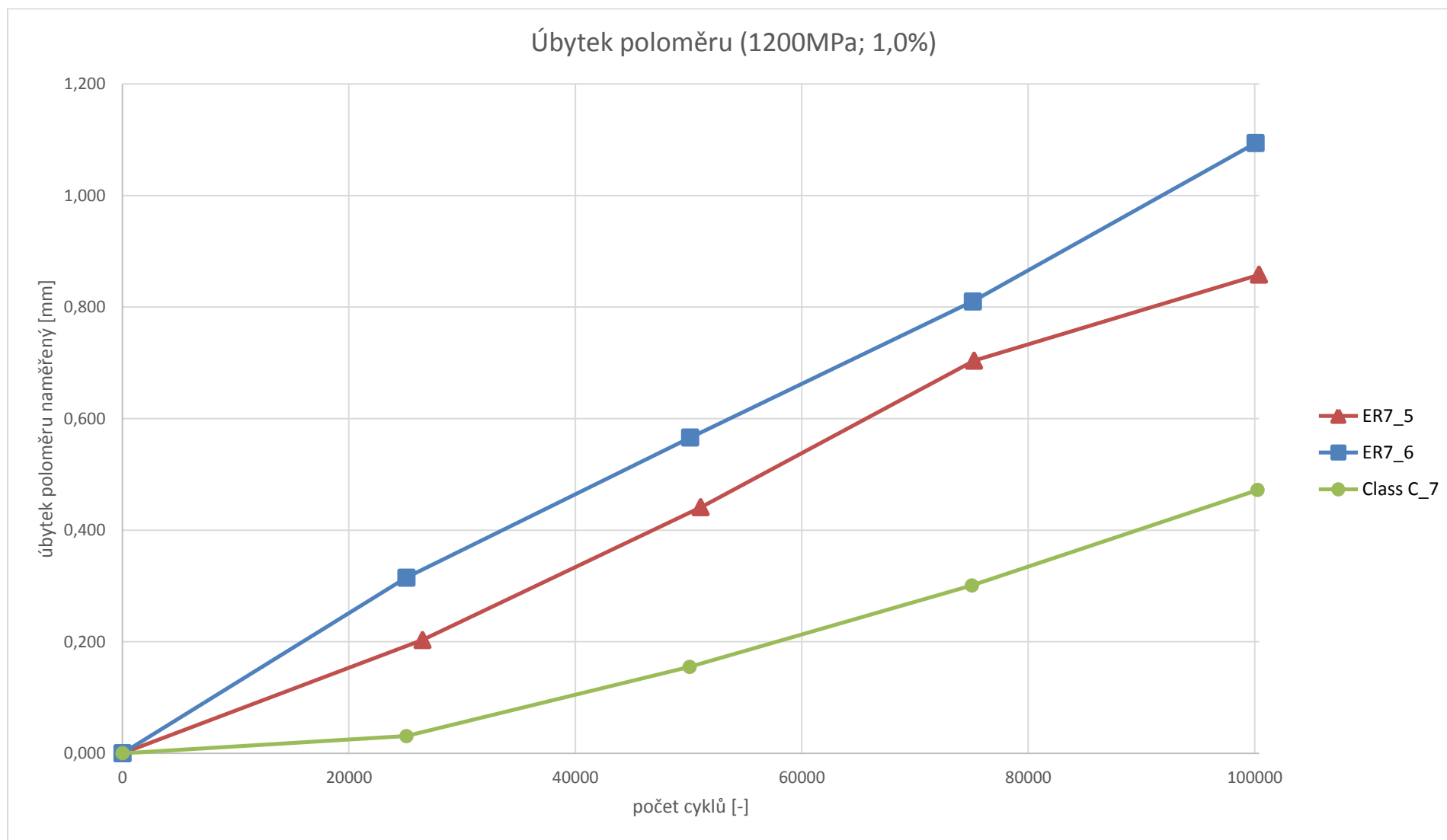
	kotouč 6		kotouč 7		kotouč 8		kotouč 9		kotouč 9 (zbrúšeno)	
Počet cyklů	Střední hodnota průměru [mm]	Úbytek hmotnosti [g]	Střední hodnota průměru [mm]	Úbytek hmotnosti [g]	Střední hodnota průměru [mm]	Úbytek hmotnosti [g]	Střední hodnota průměru [mm]	Úbytek hmotnosti [g]	Střední hodnota průměru [mm]	Úbytek hmotnosti [g]
0	220,00	5777,50	218,04	5595,57	216,82	5509,70	217,85	5605,64	217,69	5590,60
100 000	219,54	5771,55	217,67	5590,54	216,70	5507,64	217,64	5600,27	217,62	5588,16

	kotouč 11		kotouč 13		kotouč 12	
Počet cyklů	Střední hodnota průměru [mm]	Úbytek hmotnosti [g]	Střední hodnota průměru [mm]	Úbytek hmotnosti [g]	Střední hodnota průměru [mm]	Úbytek hmotnosti [g]
0	219,90	5741,01	220,00	5780,71	219,76	5789,14
25 000			219,78	5780,22	219,76	5788,54
50 000			219,90	5779,45	219,71	5787,08
75 000			219,85	5778,55	219,68	5785,91
100 000	219,71	5736,28	219,87	5777,57	219,67	5782,22

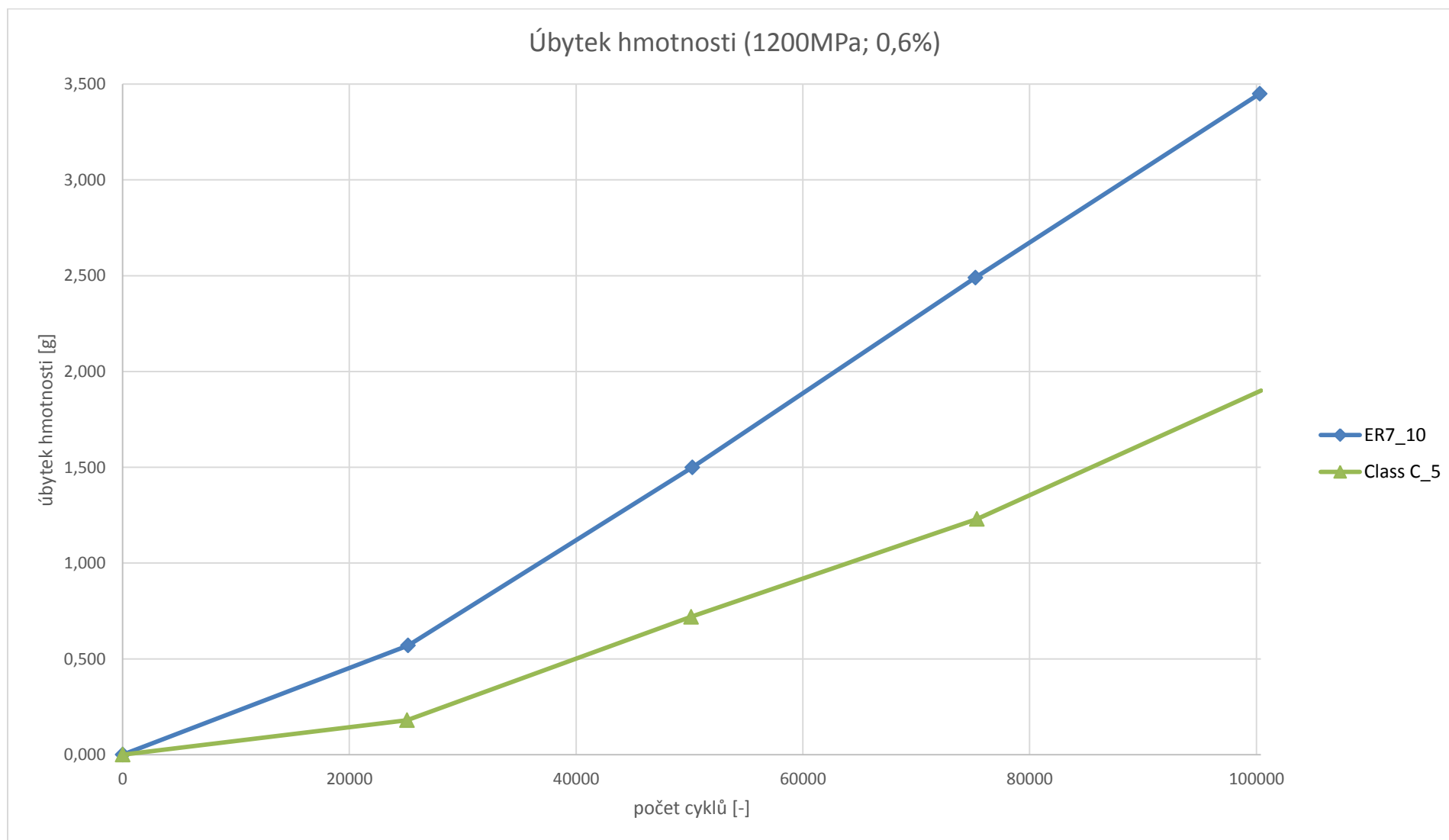
Příloha 12 – úbytek poloměru (1200MPa; 0,6%)



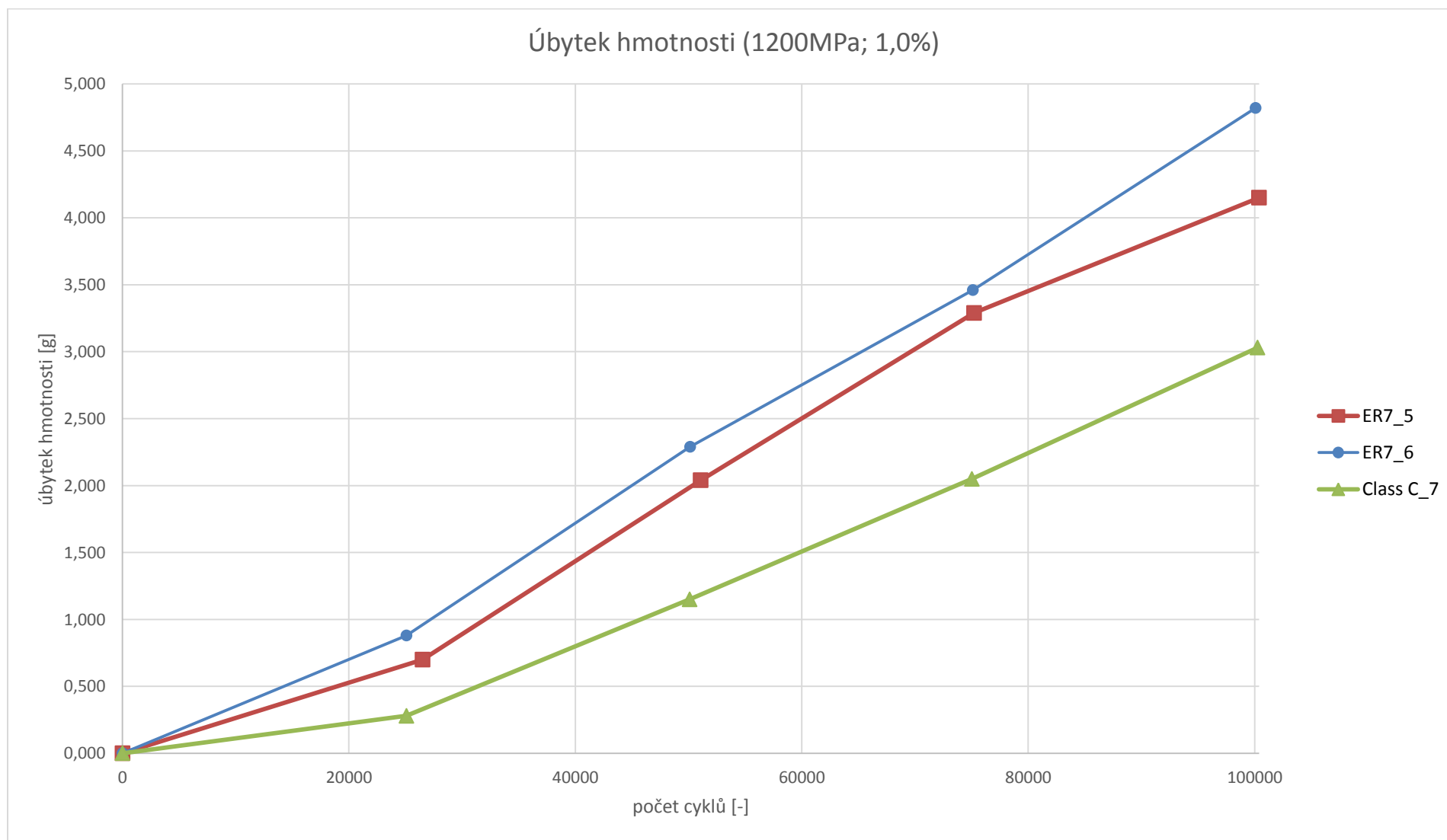
Příloha 13 – úbytek poloměru (1200MPa; 1,0%)



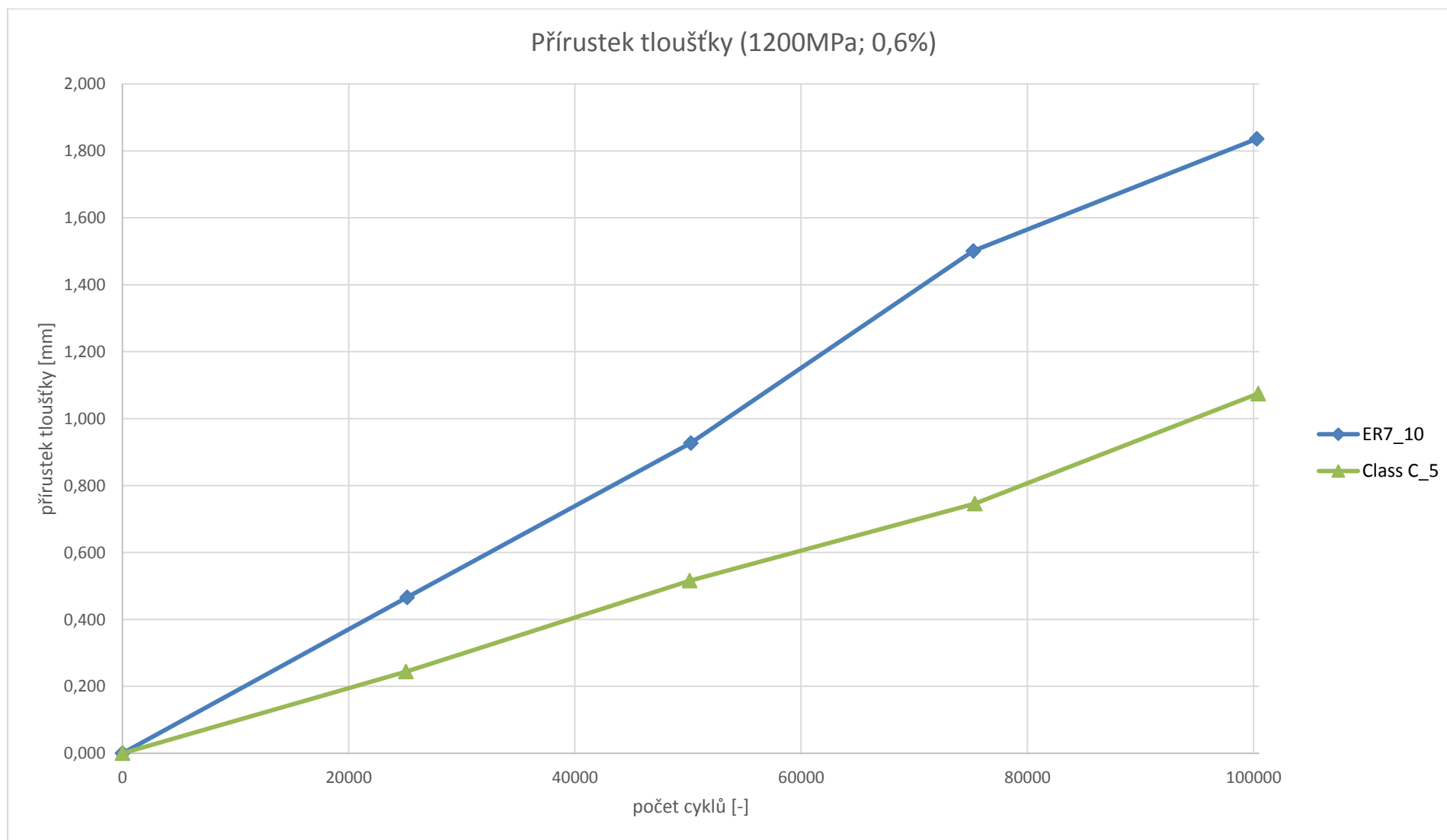
Příloha 14 – úbytek hmotnosti (1200MPa; 0,6%)



Příloha 15 – úbytek hmotnosti (1200MPa; 1,0%)



Příloha 16 – úbytek tloušťky (1200MPa; 0,6%)



Příloha 17 – úbytek tloušťky (1200MPa; 1,0%)

